



**ТОМСКИЙ
ПОЛИТЕХНИЧЕСКИЙ
УНИВЕРСИТЕТ**

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

**ИЗВЕСТИЯ
ТОМСКОГО ПОЛИТЕХНИЧЕСКОГО УНИВЕРСИТЕТА
ИНЖИНИРИНГ ГЕОРЕСУРСОВ**

Том 335, № 9, 2024

Издательство
Томского политехнического университета
2024

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)
Контарович А.Э., д-р геол.-минерал. наук (Россия)
Белозеров В.Б., д-р геол.-минерал. наук (Россия)
Никитенков Н.Н., д-р физ.-мат. наук (Россия)
Силкин В.М., д-р физ.-мат. наук (Испания)
Коротеев Ю.М., д-р физ.-мат. наук (Россия)
Уленев О.Н., д-р физ.-мат. наук (Россия)
Борисов А.М., д-р физ.-мат. наук (Россия)
Коршунов А.В., д-р хим. наук (Россия)
Пестряков А.Н., д-р хим. наук (Россия)
Тойпель У., Dsc (Германия)
Джин-Чун Ким, Dsc (Южная Корея)
Заворин А.С., д-р техн. наук (Россия)
Ханьялич К., Dsc (Нидерланды)
Маркович Д.М., д-р физ.-мат. наук (Россия)
Алексеев С.В., д-р физ.-мат. наук (Россия)
Воропай Н.И., д-р техн. наук (Россия)
Кочегуров А.И., канд. техн. наук (Россия)
Руи Д., PhD (Португалия)
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)
Абутапилова 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)
Хакимьянов М.И., 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)
Мин Р.С., д-р хим. 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, 2024

УВАЖАЕМЫЕ ЧИТАТЕЛИ!

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

Учредителем является Томский политехнический университет.

Журнал зарегистрирован Федеральной службой по надзору в сфере связи, информационных технологий и массовых коммуникаций (Роскомнадзор) – 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 геоактивов.

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

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

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

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

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

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

Окончательное решение по публикации статьи принимает главный редактор журнала.

Все материалы размещаются в журнале на бесплатной основе.

Журнал издается ежемесячно.

Полнотекстовый доступ к электронной версии журнала возможен на сайтах www.elibrary.ru, 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 335, № 9, 2024

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)
Belozarov 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)
Khakimyanov M.I., Dr. Sc. (Russia)
Boyarko G.Yu., Dr. Sc., Cand. Sc. (Russia)
Strizhak P.A., Dr. Sc. (Russia)
Min R.S., 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 Federal Service for Supervision of Communications, Information Technology and Mass Media (Roskomnadzor)).

ISSN (print) – 2500-1019

ISSN (on-line) – 2413-1830

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

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

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

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

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

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

The publication of manuscripts is free of charge.

The journal is on open access on
www.elibrary.ru, scholar.google.com.

СОДЕРЖАНИЕ

CONTENTS

- Применение ультразвука для выщелачивания вьетнамского монацитового концентрата растворами NaOH с получением хлоридов редкоземельных элементов**
Хоанг С.Т., Хоанг Н., Нгуен Т.М., Хоанг Т.Т., Нго В.Т., Хоанг В.Д., Тран Н.Х., Вьонг Х.А., Нгуен Х.Д., Ле Х.Ш., Карелин В.А.
- Буровой раствор для бурения многолетнемерзлых горных пород**
Третьяк А.Я., Чумаков А.А., Кривошеев К.В.
- Оценка особенностей аэрогенного воздействия Норильского промышленного комплекса на природную среду с использованием эпигейных лишайников**
Горбунов А.В., Петренко Д.Б., Ермолаев Б.В., Дронова А.А., Аристархова Е.В., Окина О.И.
- Magnetic properties of lake Bannoe sediments (Southern Urals, Russia)**
Yusupova A.R., Nurgalieva N.G., Kuzina D.M., Chernova O.S., Antonenko V.V.
- Проветривание тупиковых очистных камер большого сечения в условиях изменяющегося объема навала руды**
Накаряков Е.В., Гришин Е.Л., Левин Л.Ю.
- Особенности формирования природно-техногенных систем в пределах участков закачки Далдынского кимберлитового поля (Западная Якутия)**
Янников А.М., Корепанов А.Ю., Стручкова А.С.
- Геологические опасности при обосновании регламентов градостроительного развития**
Трацевская Е.Ю.
- Эколого-геохимическая оценка почв селитебных территорий Восточного Забайкалья**
Абрамов Б.Н., Цыренов Т.Г., Михеева Н.Ю., Филенко Р.А., Усманов М.Т.
- Природные и антропогенные факторы, обуславливающие активность геологических процессов территории Абаканской агломерации**
Строкова Л.А., Сагалаков Д.Ю.
- Влияние свойств углеродного компонента на теплофизические характеристики полимерных композиционных материалов для электротехнических устройств**
Минакова Н.Н., Ушаков В.Я.
- Разработка виброзащитной системы с квазиулеовой жесткостью и регулируемыми параметрами**
Кувшинов К.А., Гаврилин А.Н., Мойзес Б.Б., Нижегородов А.И., Кузнецов М.А.
- Электромеханические процессы в электроусилителе руля на основе синхронного двигателя с постоянными магнитами**
Гарганеев А.Г., Ибрагим А.И., Ульянов Д.И., Антропов А.А.
- Миграция химических элементов в подземных водах горнопромышленной территории**
Рыбникова Л.С., Рыбников П.А., Наволокина В.Ю.
- Анализ применения методов машинного обучения в задачах классификации пород на образцах керна**
Кочегуров А.И., Денисов В.И., Задорожных Е.А.
- 7 Application of ultrasound for leaching Vietnamese monazite concentrate with NaOH solutions to obtain chlorides of rare earth elements**
Hoang X.T., Hoang N., Nguyen T.M., Hoang T.T., Ngo V.T., Hoang V.D., Tran N.H., Vuong H.A., Nguyen H.D., Le H.S., Karelin V.A.
- 24 Drilling fluid for drilling permafrost rocks**
Tretyak A.Ya., Chumakov A.A., Krivosheev K.V.
- 31 Assessment of the aerogenic impact of the Norilsk industrial complex on the natural environment using epigeal lichens**
Gorbunov A.V., Petrenko D.B., Ermolaev B.V., Dronova A.A., Aristarkhova E.V., Okina O.I.
- 40 Магнитные свойства донных отложений озера Банное (Южный Урал, Россия)**
Юсупова А.Р., Нургалиева Н.Г., Кузина Д.М., Чернова О.С., Антоненко В.В.
- 51 Ventilation of large section blind headings under conditions of changing ore load size**
Nakariakov E.V., Grishin E.L., Levin L.Yu.
- 61 Features of the formation of natural-technical systems within the injection areas of the Daldyn kimberlite field (Western Yakutia)**
Yannikov A.M., Korepanov A.Yu., Struchkova A.S.
- 73 Geological hazards when justifying the regulations of urban development**
Tratsevskaia E.Yu.
- 84 Ecological and geochemical assessment of soils in residential areas of Eastern Transbaikalia**
Abramov B.N., Tsyrenov T.G., Mikheeva N.Yu., Filenko R.A., Usmanov M.T.
- 94 Natural and anthropogenic factors that determine the activity of geological processes of the Abakan agglomeration**
Strokov L.A., Sagalakov D.Yu.
- 107 Effect of carbon component properties on thermal physical characteristics of polymer composite materials for electrical devices**
Minakova N.N., Ushakov V.Ya.
- 115 Development of vibration protection system with quasi-zero stiffness and adjustable parameters**
Kuvshinov K.A., Gavrilin A.N., Moyzes B.B., Nizhegorodov A.I., Kuznetsov M.A.
- 128 Electromechanical processes in electric power steering system based on permanent magnet synchronous motor**
Garganeev A.G., Ibrahim Ahmed, Ulyanov D.I., Antropov A.A.
- 137 Chemical elements migration in ground waters of mining territory**
Rybnikova L.S., Rybnikov P.A., Navolokina V.Yu.
- 148 Analysis of applying machine learning methods in rock classification problems on core samples**
Kochegurov A.I., Denisov V.I., Zadorozhnykh E.A.

- | | |
|--|---|
| <p>Температурный режим торфяников Западной Сибири вблизи южной границы распространения многолетнемерзлых пород
 Московченко Д.В., Губарьков А.А., Фахретдинов А.В.</p> <p>Применение противотурбулентных присадок в качестве способа уменьшения тепловых потерь при перекачке по трубопроводу
 Банерджи Т., Шестаков Р.А.</p> <p>Возможность переработки фосфогипса с получением подщелачивающего реагента
 Монастырский Д.И., Куликова М.А., Шабельская Н.П., Ульянова В.А., Егорова М.А.</p> <p>Магнитостратиграфия верхнеюрских и нижнемеловых отложений Большехетской структурной террасы
 Колмаков А.Ю., Меркулов В.П., Семенова А.С., Осипова Е.Н.</p> <p>Разработка наблюдателя с оперативным мониторингом угловой скорости ротора и момента сопротивления на валу погружного асинхронного двигателя
 Глазырин А.С., Попов С.С., Попов Е.И., Копырин В.А., Хамитов Р.Н., Филипас А.А., Тимошкин В.В., Беляускене Е.А., Кулеш Ю.О., Боловин Е.В., Ковалев В.З., Денек М.В.</p> <p>Термины для описания атмосферных осадений веществ на поверхность
 Янченко Н.И.</p> | <p>160 Thermal regime of peatlands in Western Siberia near the southern border of the permafrost
 Moskovchenko D.V., Gubarkov A.A., Fakhretdinov A.V.</p> <p>169 Application of drag reduction agents as a method for reducing heat loss during pumping through a pipeline
 Banerjee T., Shestakov R.A.</p> <p>183 Possibility of processing phosphogypsum to obtain an alkalizing reagent
 Monastyrsky D.I., Kulikova M.A., Shabelskaya N.P., Ulyanova V.A., Egorova M.A.</p> <p>191 Magnetostratigraphy of the Upper Jurassic and Lower Cretaceous deposits of the Bolshekhetskaya structural terrace
 Kolmakov A.Yu., Merkulov V.P., Semenova A.S., Osipova E.N.</p> <p>203 Desing of an observer with real time monitoring speed and load torque for submersible induction motors
 Glazyrin A.S., Popov S.S., Popov E.I., Kopyrin V.A., Khamitov R.N., Filipas A.A., Timoshkin V.V., Beliauskene E.A., Kulesh Yu.O., Bolovin E.V., Kovalev V.Z., Deneko M.V.</p> <p>220 Terms for describing atmospheric deposition of substances on surfaces
 Ianchenko N.I.</p> |
|--|---|

УДК 546.161.541.127/.127.4
DOI: 10.18799/24131830/2024/9/4749
Шифр специальности ВАК: 2.6.8

Применение ультразвука для выщелачивания вьетнамского монацитового концентрата растворами NaOH с получением хлоридов редкоземельных элементов

С.Т. Хоанг¹, Н. Хоанг¹, Т.М. Нгуен¹, Т.Т. Хоанг¹, В.Т. Нго¹, В.Д. Хоанг¹,
Н.Х. Тран¹, Х.А. Выонг¹, Х.Д. Нгуен¹, Х.Ш. Ле¹, В.А. Карелин²✉

¹ Институт технологии радиоактивных и редких элементов, Вьетнам, г. Ханой

² Национальный исследовательский Томский политехнический университет, Россия, г. Томск

✉ vakarelin@tpu.ru

Аннотация. Актуальность. Несмотря на использование технологии щелочного вскрытия для переработки монацитового концентрата в промышленности, такой метод имеет ряд ограничений, таких как низкая эффективность вскрытия концентрата, необходимость применения большого избытка щелочи и длительное время протекания процесса. **Цель.** Усовершенствование существующей технологии для преодоления указанных ограничений. **Методы.** Сплавления с NaOH под давлением и сплавления с NaOH в сочетании с измельчением на шаровой мельнице, а также сплавление с NaOH с помощью ультразвука высокой интенсивности. Проводятся исследования по изучению влияния ультразвуковых колебаний высокой интенсивности на увеличение скорости выщелачивания/сплавления при проведении выщелачивания медных, ванадиевых, никелевых, бокситовых и урановых руд. Настоящая статья посвящена изучению влияния ультразвука высокой интенсивности на эффективность вскрытия монацитового концентрата растворами NaOH. Экспериментальные данные получены методами масспектрометрического, рентгеноструктурного и ICP-OES анализа. **Результаты и выводы.** Определены оптимальные условия выщелачивания партий проб массой от 100 г до 1 кг. Проведены исследования по разделению радиоактивных элементов и примесей в растворе хлоридов редкоземельных элементов, получению очищенного от радиоактивных компонентов и примесей раствора хлоридов редкоземельных элементов. Показано, что при ультразвуковом воздействии устраняются недостатки традиционной технологии сплавления с NaOH, что может быть использовано при проведении глубокой переработки вьетнамского монацитового концентрата. Приведены условия получения хлоридов РЗЭ из предварительно вскрытого монацитового концентрата.

Ключевые слова: вьетнамский монацитовый концентрат, гидроксид натрия, ультразвук высокой интенсивности, вскрытие в щелочных растворах, получение хлоридов редкоземельных элементов

Благодарности: Исследование выполнено по инициативе Института технологии радиоактивных и редких элементов, г. Ханой, Вьетнам.

Для цитирования: Применение ультразвука для выщелачивания вьетнамского монацитового концентрата растворами NaOH с получением хлоридов редкоземельных элементов / С.Т. Хоанг, Н. Хоанг, Т.М. Нгуен, Т.Т. Хоанг, В.Т. Нго, В.Д. Хоанг, Н.Х. Тран, Х.А. Выонг, Х.Д. Нгуен, Х.Ш. Ле, В.А. Карелин // Известия Томского политехнического университета. Инжиниринг георесурсов. – 2024. – Т. 335. – № 9. – С. 7–23. DOI: 10.18799/24131830/2024/9/4749

UDC 546.161.541.127/.127.4
DOI: 10.18799/24131830/2024/9/4749

Application of ultrasound for leaching Vietnamese monazite concentrate with NaOH solutions to obtain chlorides of rare earth elements

X.T. Hoang¹, N. Hoang¹, T.M. Nguyen¹, T.T. Hoang¹, V.T. Ngo¹, V.D. Hoang¹,
N.H. Tran¹, H.A. Vuong¹, H.D. Nguyen¹, H.S. Le¹, V.A. Karelin²✉

¹ Institute of Radioactive and Rare Element Technology, Hanoi, Vietnam

² National Research Tomsk Polytechnic University, Tomsk, Russian Federation

✉ vakarelin@tpu.ru

Abstract. Relevance. Despite the use of alkali stripping technology for processing monazite concentrate in industry, this method has a number of limitations, such as low efficiency of concentrate stripping, the need to use a large excess of alkali and a long process time. **Aim.** Improvement of existing technology to overcome these limitations. **Methods.** Fusion with NaOH under pressure and fusion with NaOH combined with ball milling, as well as fusion with NaOH using high intensity ultrasound. High-intensity ultrasound has long been studied and used in industry to intensify leaching/alloying in various applications to increase efficiency and speed in leaching for copper, vanadium, nickel, bauxite and uranium ores. This article is devoted to studying the influence of high-intensity ultrasound on the efficiency of opening monazite concentrate with NaOH solutions. Experimental data were obtained using mass spectrometric, X-ray diffraction and ICP-OES analysis methods. **Results and conclusions.** The optimal conditions for leaching batches of samples weighing from 100 g to 1 kg were determined. The authors have carried out the research on the separation of radioactive elements and impurities in a solution of rare earth chlorides, obtaining a solution of rare earth chlorides purified from radioactive components and impurities. It was shown that ultrasonic exposure eliminates the disadvantages of traditional fusion technology with NaOH, which can be used for deep processing of Vietnamese monazite concentrate. The conditions for obtaining REE chlorides from a previously opened monazite concentrate are given.

Keywords: Vietnamese monazite concentrate, sodium hydroxide, high-intensity ultrasound, opening in alkaline solutions, production of rare earth chlorides

Acknowledgments: The study was carried out on the initiative of the Institute of Technology of Radioactive and Rare Elements, Hanoi, Vietnam.

For citation: Hoang X.T., Hoang N., Nguyen T.M., Hoang T.T., Ngo V.T., Hoang V.D., Tran N.H., Vuong H.A., Nguyen H.D., Le H.S., Karelin V.A. Application of ultrasound for leaching Vietnamese monazite concentrate with NaOH solutions to obtain chlorides of rare earth elements. *Bulletin of the Tomsk Polytechnic University. Geo Assets Engineering*, 2024, vol. 335, no. 9, pp. 7–23. DOI: 10.18799/24131830/2024/9/4749

Введение

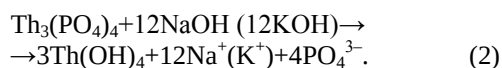
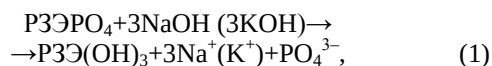
Редкоземельные элементы (РЗЭ) встречаются примерно в 250 известных в природе минералах, обычно существующих в виде трехвалентных карбонатов, оксидов, фосфатов и силикатов [1, 2]. Монацит – один из четырех основных редкоземельных минералов, существующий в виде фосфатного соединения (РЗЭ, Th)PO₄, содержащий ThO₂ 4–12 %, Ce₂O₃ 20–30 % и La₂O₃ 10–40 % [3].

К странам с большими запасами монацита относятся Бразилия (21 млн т – 70 % монацита), Индия (6,9 млн т – 100 % монацита), Австралия (5,7 млн т – 70 % монацита), США (1,8 млн т – 70 % монацита), Южная Африка (0,8 млн т – 90 % монацита) и др. [4, 5]. Китай лидирует с общими запасами руд РЗЭ до 44,0 млн т, но РЗЭ находятся в бастнезите, а запасы монацита незначительны. Во Вьетнаме и Рос-

сии запасы составляют 22,0 и 10,0 млн т соответственно, но они еще не полностью оценены. Монацитовые и бастнезитовые (месторождение Dong Rao) руды являются основным источником РЗЭ во Вьетнаме [6]. РЗЭ в России получают из: хибинского апатитового концентрата Кольского полуострова [7], гагаринита и иттрофлюорита Катугинского месторождения [8] (Забайкалье), ниобий-редкоземельных руд Чукотконского месторождения [9], перовскита-титаномагнетита Африкандской перовскитовой руды [10] (Мурманская обл.) и алюмосиликатного бурого угля Райчихинского месторождения [11] (Приамурье, Дальний восток).

Для переработки монацитового концентрата (МК) в промышленности используют технологии вскрытия серной или азотной кислотами или выщелачивания гидроксидом натрия. Кислотными

технологиями [12] трудно отделить Th от PЗЭ, а экстракцией невозможно разделить фосфаты в МК [13]. Для переработки монацита предложена технология [14] выщелачивания раствором NaOH или KOH, описываемая уравнениями (1), (2):



Оптимальные условия выщелачивания нерастворимых гидроксидов PЗЭ и Th из МК: размер частиц <10 мкм, 70%-й раствор NaOH, температура 150 °С и время 2 ч [15]. Th и U можно селективно отделить от PЗЭ экстракцией в серной, азотной или соляной кислотах или селективно растворить при pH=3,4–4 и 70–80 °С.

Исследования по вскрытию МК проводились в различных странах. В Южной Корее изучено выщелачивание монацита с эффективностью ~99 % в 50%-м NaOH при 170 °С в течение 4 час [16]. В [17] выполнены исследования по извлечению Th из египетских монацитовых песков выщелачиванием NaOH и осаждением фосфатов раствором Na₂CO₃. Предложен метод выделения и очистки Th из египетских монацитовых песков после их обработки щелочью [18]. В [19] описан метод переработки монацита, содержащего PЗЭ Се-подгруппы, выщелачиванием NaOH в автоклавах с предварительным измельчением в шаровых мельницах. Процессы измельчения и выщелачивания объединены в одну стадию, вдвое сокращающую количество NaOH. При вскрытии австралийского МК показано, что степень извлечения (α) PЗЭ в 80%-м растворе NaOH достигает 98 % для частиц размером <45 мкм, соотношении NaOH:МК=1.5:1, температуре 140 °С и времени 3 часа. Для вскрытия бразильского МК размер частиц должен быть <45 мкм и температура 140–200 °С.

Во Вьетнаме исследования по переработке МК проводятся в Институте редкоземельных технологий Вьетнамского института атомной энергии на пилотной линии производительностью 60 т/год [20]. МК измельчали до крупности 0,05–0,12 мм (120–270 меш) и выщелачивали при соотношении NaOH:МК ~2:3 в течение 8–10 ч, 135–140 °С в 30–45%-м растворе NaOH. Смесь перемешивали и подавали пар под давлением 7 атм при ~170 °С.

Исследован процесс выщелачивания ксенотимового концентрата раствором NaOH. При вскрытии нескольких партий концентрата массой 1–5 кг при давлении 10,5 атм и добавлении железных опилок для улучшения перемешивания эффективность составила ~90 % для концентрата крупностью 200 меш (75 мкм). При более высоком давлении ~20 атм и соотношении NaOH/концентрат=2/1

при концентрации NaOH=12,5 М, температуре 240 °С, времени вскрытия 4 ч эффективность выщелачивания ~94,7 %, выше, чем при 10,5 атм [21].

Ультразвуковой метод применяют для осаждения сульфида меди из пыли медеплавильных печей с использованием пирротина (сульфида железа) [22]; сульфидной переработки золы, образующейся при сжигании угля, для извлечения из нее цинка, свинца и меди [23]; выщелачивания Со и Li из катодных материалов отработанных Li-ионных аккумуляторов [24]; Pb, Cu, Zn, Ni и Mn из отложений рек и водоемов [25], извлечения PЗЭ из карбоната (магматической породы) и фосфогипса [26, 27], выщелачивания цветных, черных, редких, редкоземельных и драгоценных металлов из руд [28].

Для проведения щелочного вскрытия руд применяют ультразвуковой реактор с возможностью изменения его рабочего объема [29], ультразвуковой аэрогидродешламатор для выделения шламов, например, глинистых минералов, находящихся в рудах PЗЭ коры выветривания [30], ультразвуковой проточный реактор в виде полого цилиндра, на внутренней поверхности которого размещены отражатели ультразвука, выполненные в виде тел вращения [31], аппарат ультразвуковой проточной обработки, содержащий технологический объем, выполненный в виде двух осесимметрично расположенных цилиндрических камер с патрубками, и источник ультразвука [32], способ возбуждения акустических колебаний в текучей среде и устройство для его осуществления [33]. Ультразвуковые источники применяют при переработке вторичных ресурсов, например, для исследования механизма и кинетики цианирования черновых золотоносных концентратов с содержанием золота 7,5 г/т [34].

Для увеличения эффективности выщелачивания NaOH получаемого во Вьетнаме МК проведено исследование по изучению интенсивности ультразвукового метода на степень выщелачивания. Предлагаемый метод в дальнейшем можно использовать для глубокой переработки монацита во Вьетнаме.

Экспериментальные исследования

Объектом настоящего исследования является МК, производимый компанией Hung Thinh Titanium Slag Plant Co., Ltd. в Биньтхуане (Вьетнам). МК получают из тяжелых песков, из остаточных компонентов (хвостов), содержащих PЗЭ, образующихся после выделения ильменита и циркона.

Методы проведения исследования

В исходном МК ситовым анализом определяли гранулометрический состав частиц, их морфологию с использованием оптической микроскопии (SEM); кристаллическую фазу XRD-методом; эле-

ментный состав методами РФА, СЭМ-ЭДС, ИСП-ОЭС и минеральный состав в тяжелой жидкости. Затем на планетарной мельнице проводили измельчение в водном растворе и классификацию частиц с помощью сит размером <45, 45–54, 54–63, 63–75 и >75 мкм.

Процесс выщелачивания NaOH изучали на образцах массой 100 г в двух режимах: при обычном перемешивании и при воздействии ультразвуковых колебаний. Определяли влияние размера частиц концентрата, соотношения NaOH/концентрат, концентрации раствора NaOH, температуры и времени на степень вскрытия. Полученный фильтрат, содержащий растворенный фосфат в избытке щелочи, затем полностью растворяли в HCl. Для расчета эффективности выщелачивания нерастворившийся остаток взвешивали. Исходя из полученных результатов определяли условия выщелачивания как при обычном перемешивании, так и при использовании ультразвука.

После определения оптимальных условий на образцах массой 100 г массу пробы увеличивали до 1 кг. Образующийся нерастворимый остаток взвешивали и рассчитывали эффективность выщелачивания РЗЭ, U и Th. Элементный состав анализировали методом ICP-OES и повторно определяли оптимальные технологические параметры процесса. U, Th, Ra и примеси отделяли от раствора хлоридов U-Th-РЗЭ, а образующиеся при оксалатном/карбонатном осаждении осадки РЗЭ прокаливали для достижения степени чистоты по радиоактивным элементам 99 % (рис. 1).

Результаты и их обсуждение

Характеристика МК месторождения

Бинь Туан, Вьетнам

Гранулометрический состав и морфология частиц

Гранулометрический состав исходного МК определяли методом «мокрого сита», пропуская его через сита с размером отверстий 75, 63, 54 и 45 мкм. Сита укладывали друг на друга последовательно сверху вниз. После просеивания концентрат над ситом высушивали и взвешивали для опреде-

ления количества частиц каждого размера. Установлено, что ~100 % МК состоит из частиц размером >75 мкм.

Морфологию частиц анализировали методом микроскопии в светлом и поляризованном свете на приборе «Stemi» DV4 (Carl Zeiss, Германия). Показано, что монацит составляет большую часть образца и представлен в виде стертых зерен от бледно-желтого до коричневатого или красновато-желтого цвета, обладающих блеском и без спайности. Значительная часть образца состоит из циркона и характеризуется типичными призматическими кристаллами, бесцветным, стеклянным/алмазным блеском, хрупкостью и неполной спайностью. В других минералах могут находиться ксенотим, имеющий призматическую форму кристаллов, черного/красно-коричневого цвета со стеклянным/жирным блеском и полной спайностью. На рис. 2 показано изображение МК, полученное методом оптической микроскопии в поляризованном свете 1 и 2 николя.

Кристаллический фазовый и элементный составы

Кристаллический фазовый состав образца МК анализировали методом дифракции рентгеновских лучей (XRD) на приборе Empyrean (PANalytical, Нидерланды). Рентгеновские спектры образца и стандартные спектры монацита, циркона и ксенотима представлены на рис. 3. Показано, что пики спектра образца МК совпадают со стандартными спектрами. Видно, что исходный МК в основном состоит из монацита. Кроме того, имеется небольшое количество циркона и незначительное количество других минералов, например, касситерита.

Предварительные расчеты основных фаз минералов в исходной пробе МК выполнены на основе рентгеноструктурных спектров. Установлено, что массовая доля монацита ~91 % в исходном образце при незначительной массовой доле ксенотима менее 1 % и относительно высокой массовой доле циркона около 8 %.

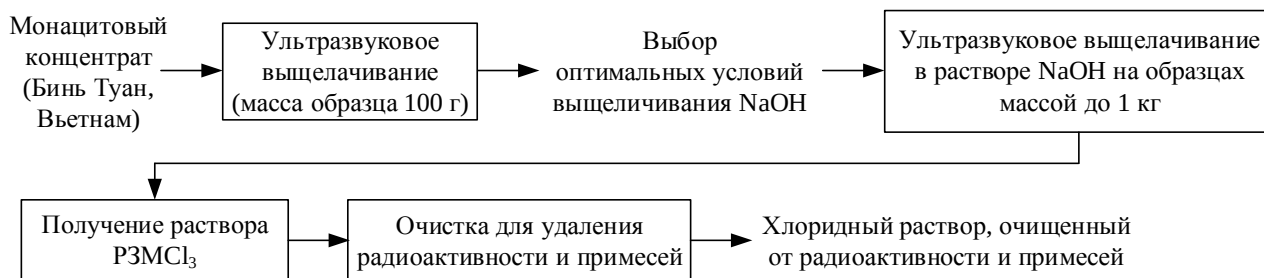


Рис. 1. Методы проведения исследования

Fig. 1. Research methods

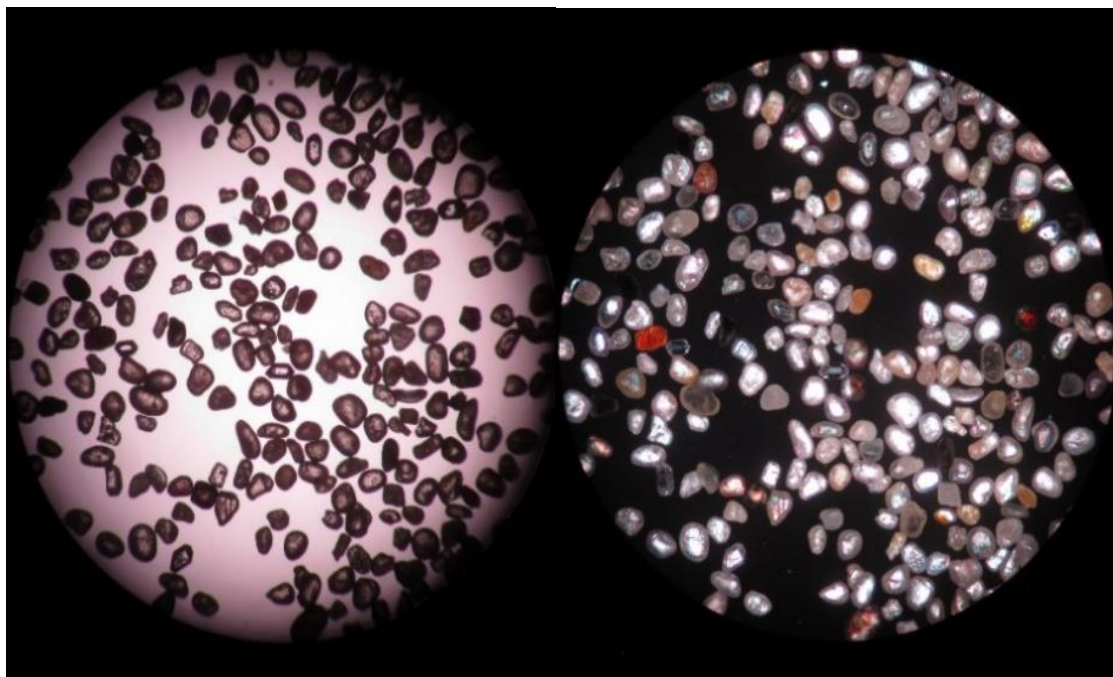


Рис. 2. Изображение монацитового концентрата, полученное методом оптической микроскопии в поляризованном свете с 1 николем (слева) и 2 николями (справа)

Fig. 2. Polarized light optical microscopy image of monazite concentrate with 1 nicol (left) and 2 nicols (right)

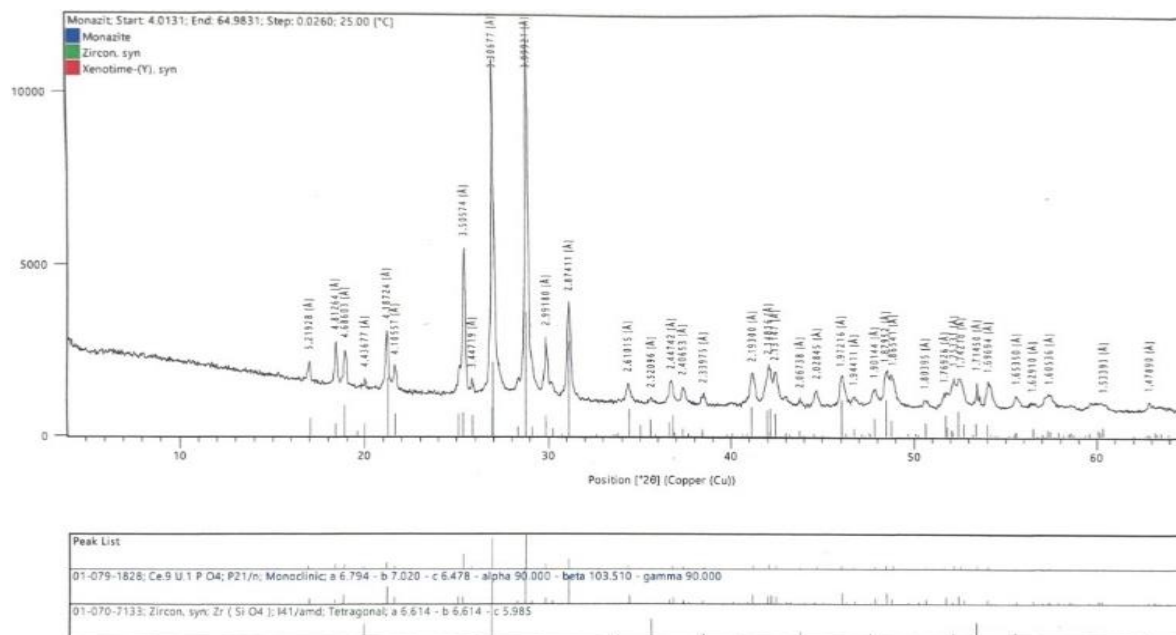


Рис. 3. Спектр исходного монацитового концентрата, полученный методом дифракции рентгеновских лучей
Fig. 3. Spectrum of the original monazite concentrate obtained by X-ray diffraction

Метод сканирующей электронной микроскопии (SEM-EDAX метод) и оптико-эмиссионная спектроскопия с индуктивно-связанной плазмой (ICP-OES-метод)

Элементный и минеральный составы рассчитывали и определяли на основе SEM-EDS спектров. В результате установлено, что во входном МК находятся циркон, касситерит и шпинель.

Результаты химического анализа, а также результаты анализа ICP-OES методом представлены в табл. 1, в которой показано содержание урана, тория и общее количество оксидов редкоземельных элементов. Другие микроэлементы, такие как железо и титан, составляют незначительную массовую долю.

Таблица 1. Результаты анализа состава редкоземельных элементов, U, Th и некоторых примесных элементов в исходном монацитовом концентрате методом ICP-OES

Table 1. Results of analysis of the composition of rare earth elements, U, Th and some impurity elements in the initial monazite concentrate using the ICP-OES method

Элементы Elements	$\Sigma \text{PЗЭ}_2\text{O}_3 / \Sigma \text{RЗЭ}_2\text{O}_3$	U	Th	Fe	Ti
Содержание Concentration, %	46,15	0,35	4,76	0,09	0,02

Минералогический состав

Состав минералов в исходной пробе МК анализировали методом «тяжелой жидкости». Метод состоит в определении скорости падения частиц образца в нескольких кюветах толщиной 0,5–2 мм, расположенных на расстоянии 1,5–2 см друг от друга. Качественный состав минералов, входящих в состав изучаемой пробы, определяют по скорости падения отдельных частиц.

Таблица 2. Состав тяжелых минералов в исходном образце монацитового концентрата

Table 2. Composition of heavy minerals in the initial sample of monazite concentrate

Тяжелые минералы в песке Heavy minerals in sand	Содержание/Concentration, %				
	Образец ¹ Sample ¹	Образец ² Sample ²	Образец ³ Sample ³	Усредненное значение Average value	Погрешность, % Error, %
Монацит Monazite	89	90	91	90,00	0,58
Циркон Zircon	9	5	8	7,33	1,20
Ксенотим Xenotime	2	0	~1	1,00	1,00
Ильменит Ilmenite	0	3	1,30	1,50	1,50
Турмалин Tourmaline	0	2	0,60	1,00	1,00

¹ Анализ тяжелых минералов в лаборатории минералогии Института геологии Вьетнамской академии наук и технологий/Analysis of heavy minerals in the mineralogy laboratory of the Institute of Geology of the Vietnam Academy of Sciences and Technology.

² Анализ тяжелых минералов в лаборатории анализа минералов Института геологических наук и минеральных ресурсов Вьетнама/Analysis of heavy minerals at the Mineral Analysis Laboratory of the Institute of Geological Sciences and Mineral Resources of Vietnam.

³ Рентгенографический анализ в лаборатории анализа минералов Института геологических наук и минеральных ресурсов Вьетнама/X-ray analysis at the Mineral Analysis Laboratory of the Institute of Geological Sciences and Mineral Resources of Vietnam.

В результате показано, что исходный концентрат не содержит магнитных минералов, основным компонентом являются минералы МК (89–90 %), небольшое количество циркона (5–9 %) и примесные минералы – касситерит, ксенотим, рутил, шпинель, турмалин, содержание которых не превышает 1 %. В табл. 2 представлены результаты массового фракционного анализа минералов концентрата тяжелым жидким и ранее проведенным рентгеноструктурными методами. Рассчитана относительная массовая доля минералов в исходном МК и стандартные отклонения.

В результате показано, что МК состоит примерно из 90 % монацита, 7,33 % циркона, 1 % ксенотима, 1,5 % ильменита и 1 % турмалина.

Измельчение МК в жидкости и классификация по размерам частиц

МК измельчали в водной среде на лабораторной планетарной мельнице. Определены оптимальные условия измельчения при массовом соотношении воды, концентрата и шаров 0,4:1:0,4/3. Измельчение проводили в течение 10 мин, скорости вращения 1200 об/мин и массе воды, шаров и концентрата в камере измельчения 460 г. Объем камеры – 500 мл (табл. 3).

Таблица 3. Массовое соотношение фракций при изменении соотношения монацитового концентрата и воды по сравнению с измельчением на шаровой мельнице

Table 3. Mass ratio of fractions when changing the ratio of monazite concentrate and water compared to grinding in a ball mill

Массовое соотношение Mass ratio			Сумма масс МК, шаров и воды, г Sum of masses of MC, balls and water, g	Массовая доля фракций, % Mass ratio of fractions, %				
МК MC	Шар Ball	Вода Water		>75	75–63	63–54	54–45	<45
1	1	1/3	450	>70	–	–	–	–
0,5	1	0,5/3	450	37,2	9,7	25,0	1,4	26,7
0,4	1	0,4/3	460	25,4	7,0	28,0	2,5	37,1
0,3	1	0,3/3	460	–	–	–	–	>50
0,2			450	–	–	–	–	

После измельчения материал выгружали из мельницы и частицы разделяли по фракциям на ситах с размерами ячеек 325, 230, 270 и 200 меш.

Выбор условий ультразвукового выщелачивания (для образцов массой 100 г)

В стеклянном стакане объемом 500 мл взвешивают 100 г МК, размер частиц которого представлен несколькими фракциями: >75, 75–63, 63–54, 54–45 и <45 мкм. Затем добавляют 120 г NaOH технической чистоты и 120 мл дистиллированной воды до достижения массового соотношения NaOH к МК 1,2:1. Концентрация NaOH в растворе 50 мас. %. Чтобы МК не оседал на дно стакана, смесь перемешивают мешалкой со скоростью вращения 120–180 об/мин. В исследованиях применяли ультразвуковой преобразователь ФС-1800Н (рабочая частота – 5 МГц; размеры корпуса: длина – 350 мм, диаметр – 38 мм), который погружали в реакционную смесь. Интенсивность ультразвука постепенно увеличивали до 40 % от максимальной мощности преобразователя, равной 1,8 кВт, т. е. примерно до 720 Вт. Исследования проводили в импульсном режиме, подавая ультразвуковой импульс в течение 5 с, после которого следовала пауза продолжительностью 5 с. Процесс проводили при 140 °С в течение трех часов. В ходе выщелачивания за счет испарения воды возрастает температура, поэтому для проведения процесса при 140 °С в смесь добавляли воду. Колебания температуры смеси не превышали ± 4 °С.

Смесь после выщелачивания разбавляли дистиллированной водой до объема 1 л и отстаивали, а затем для удаления выпавших в осадок фосфатов и избытка щелочи перемешивали в течение 60 мин при 70–80 °С. Образовавшейся смеси давали отстояться в течение 30 мин и затем фильтровали. Для обеспечения полноты удаления выпавшего осадка гидроксидов и избытка щелочи процесс отстаивания-фильтрации повторяли четыре раза.

Очищенный от примесей осадок гидроксидов и избыток NaOH растворяли в концентрированной HCl при 90 °С в течение 1,5 час. Смеси давали отстояться в течение 10 мин и затем фильтровали. Оставшийся нерастворимый остаток промывали 500 мл дистиллированной воды в течение 5 мин при комнатной температуре. Для обеспечения полноты удаления нерастворимых в HCl РЗЭ и других примесей промывку повторяли три раза. Определяли массу нерастворимого остатка, а методами РФА и ИСП-ОЭС анализировали его элементный состав. Кристаллическую структуру определяли методом РФА. В полученном растворе ИСП-ОЭС методом определяли концентрации U, Th, РЗЭ и других элементов. Схема исследований представлена на рис. 4.

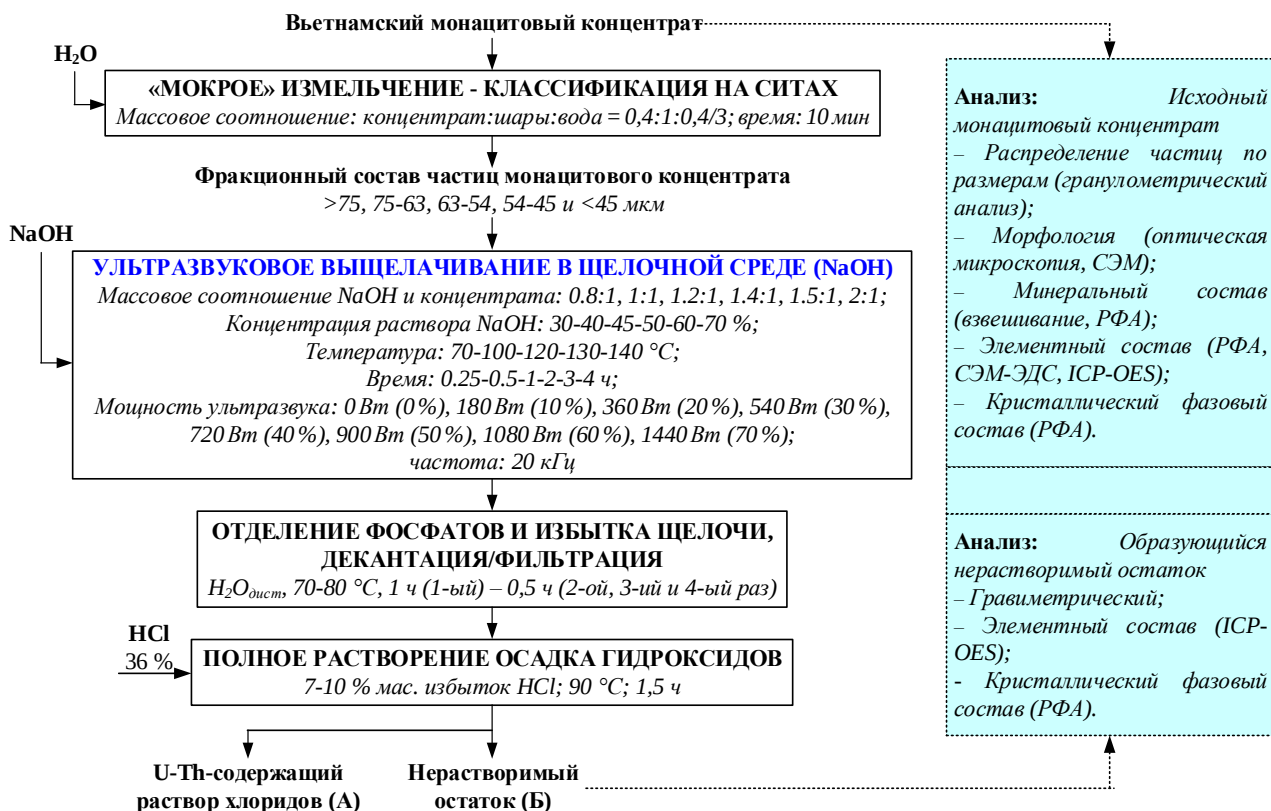


Рис. 4. Схема для изучения влияния условий выщелачивания на эффективность для образцов массой 100 г
Fig. 4. Scheme for studying the effect of leaching conditions on efficiency for 100 g samples

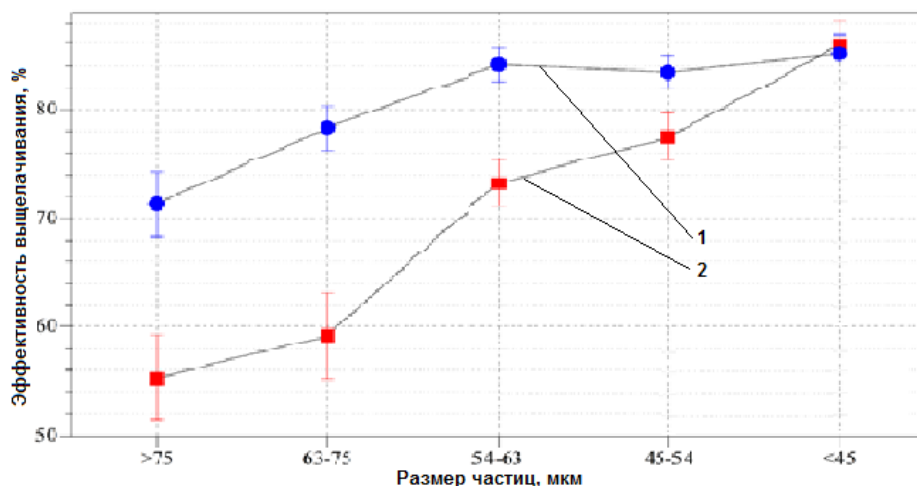


Рис. 5. Влияние размера частиц на эффективность выщелачивания при ультразвуковом воздействии и при интенсивном перемешивании: 1 – выщелачивание с использованием ультразвуковых импульсов; 2 – выщелачивание при перемешивании

Fig. 5. Particle size effect on leaching efficiency under ultrasonic influence and intensive stirring: 1 – leaching using ultrasonic pulses; 2 – leaching with stirring

Влияние размера частиц

На рис. 5 показано, что эффективность выщелачивания частиц размером >75 мкм, при ультразвуковом воздействии достигает 74 % по сравнению с 55 % при обычном перемешивании, что свидетельствует об увеличении эффективности примерно на 19 %. При размерах частиц 63–54 мкм выщелачивается примерно 84 % частиц по сравнению с 73 %, прирост составляет примерно 10 %. Однако для частиц размером <45 мкм эффективность выщелачивания незначительно уменьшается до 83 % по сравнению с 86 % при обычном перемешивании. Это можно объяснить тем, что при размере частиц ниже порогового влияние ультразвука незначительно.

Влияние массового соотношения гидроксида натрия и монацита

Эффективность ультразвукового выщелачивания (рис. 6) достигает 84 % при соотношении реагентов 1,2:1. Однако при увеличении массового соотношения с 1,2:1 до 1,4:1 эффективность достигает 87 %, т. е. возрастает всего лишь на 3 %. При соотношениях $>1,4:1$ эффективность стремится к пороговому значению – примерно 89 %. Необходимо также отметить, что с ростом соотношения NaOH:МК от 0,8 до 2,0 разность эффективностей между ультразвуковым выщелачиванием и перемешиванием падает с 37 до 7 %.

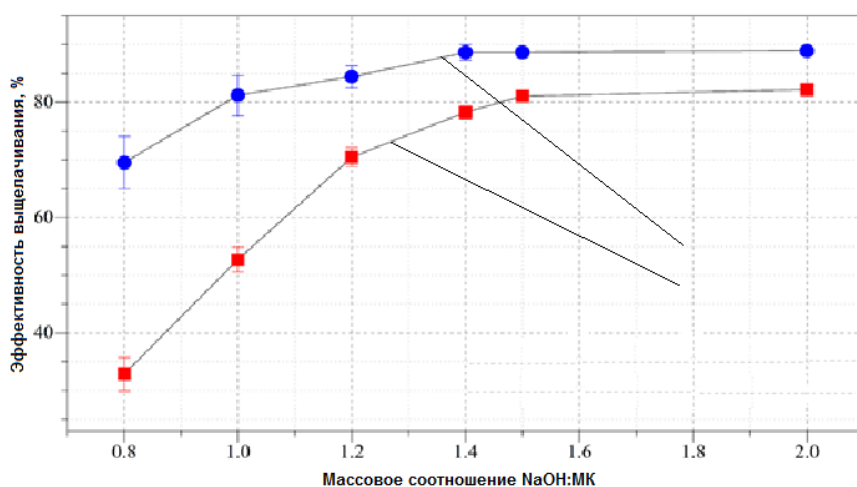


Рис. 6. Влияние соотношения NaOH:монацитовый концентрат на эффективность выщелачивания при перемешивании и мощном ультразвуковом воздействии: 1 – выщелачивание с использованием ультразвуковых импульсов; 2 – выщелачивание при перемешивании

Fig. 6. NaOH:monazite concentrate ratio effect on the efficiency of leaching under stirring and high-power ultrasonic influence: 1 – leaching using ultrasonic pulses; 2 – leaching with stirring

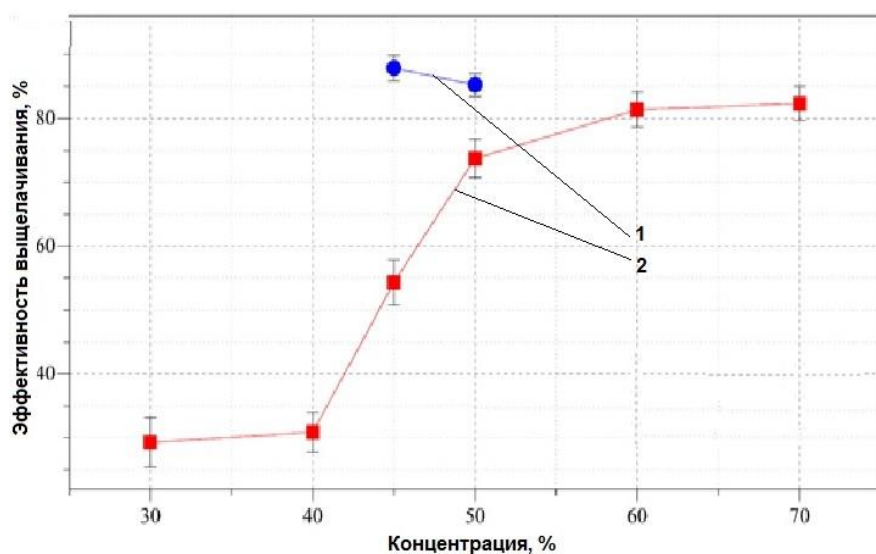


Рис. 7. Влияние концентрации NaOH на эффективность выщелачивания при перемешивании и ультразвуковом воздействии: 1 – выщелачивание с использованием ультразвуковых импульсов; 2 – выщелачивание при перемешивании

Fig. 7. NaOH concentration impact on the efficiency of leaching under stirring and ultrasonic influence: 1 – leaching using ultrasonic pulses; 2 – leaching with stirring

Влияние концентрации раствора NaOH

На рис. 7 показано, что при перемешивании без использования ультразвука и увеличении концентрации раствора NaOH с 40 до 50 % эффективность выщелачивания резко возрастает с 31 до 74 % (~2,1 раза). За пределами этого диапазона концентраций эффективность выщелачивания возрастает значительно медленнее. Например, при увеличении концентрации NaOH с 30 до 40 % эффективность увеличивается всего на ~1 %; а при увеличении концентрации с 50 до 60 % эффективность возрастает только с 74 до 81 % (~7 %).

Влияние мощности ультразвуковых импульсов

При проведении исследований были отобраны два образца МК с размером частиц 63–54 и <45 мкм (рис. 8). Для образца с частицами размером 63–54 мкм при обычном перемешивании без использования ультразвука эффективность выщелачивания достигла 77 %. При мощности ультразвуковых импульсов 180, 360 и 540 Вт эффективность выщелачивания составила ~80–84 %. Дальнейшее увеличение мощности импульсов до 720 и 900 Вт привело к увеличению эффективности выщелачивания до 88 и 90 % соответственно.

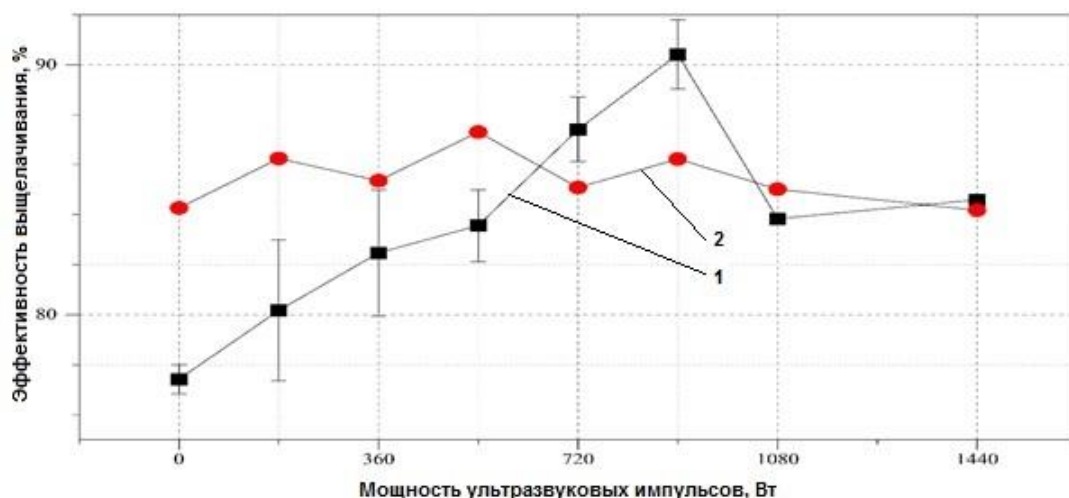


Рис. 8. Влияние мощности ультразвуковых импульсов на эффективность выщелачивания. Размер частиц образца: 1 – 63–54 мкм; 2 – <45 мкм

Fig. 8. Ultrasonic pulse power effect on leaching efficiency. Sample particle size: 1 – 63–54 μm; 2 – <45 μm

Таким образом, за счет воздействия ультразвуковых импульсов мощностью 720 и 900 Вт на слой гидроксида натрия, образующегося на поверхности частиц концентрата, происходит активация процесса и резко возрастает эффективность выщелачивания.

В ходе ультразвукового выщелачивания в 50%-м растворе NaOH эффективность достигает 85 %, что значительно выше, чем при обычном перемешивании в тех же условиях. Однако при более высокой мощности – 1080 и 1440 Вт, соответствует 60 и 80 % мощности используемого устройства, эффективность выщелачивания снизилась до 84 и 86 % соответственно. Это можно объяснить тем, что ультразвуковой преобразователь, изготовленный из пьезокерамики, быстро нагревался и находился при ~70–80 °С. В результате мощность ультразвуковых импульсов падала.

На частицы размером <45 мкм ультразвуковые импульсы практически не оказывают влияния на всех уровнях мощности, при этом эффективность выщелачивания изменялась в пределах 84–87 %. Это связано с тем, что размер частиц <45 мкм находится ниже эффективного порога воздействия ультразвуковых импульсов. Об этом явлении сообщалось в ряде предыдущих исследований.

Выбор условий выщелачивания образцов массой 1000 г

Условия выщелачивания образцов массой 100 г

По результатам выщелачивания МК для образцов массой 100 г оптимальные условия выщелачивания определяли по следующим критериям:

- 1) высокой эффективности выщелачивания, более 80 %;
- 2) значительно более высокой эффективности при оптимальном значении по сравнению с эффективностью выщелачивания при более низких значениях;
- 3) эквивалентной или незначительно меньшей эффективности при оптимальном значении по сравнению с более высокими значениями эффективности разложения.

В этих условиях определяли оптимальную температуру выщелачивания МК раствором NaOH при обычном перемешивании и при воздействии ультразвуком.

При обычном перемешивании эффективность выщелачивания ниже, поэтому необходимо обеспечить более интенсивные условия выщелачивания по сравнению с использованием ультразвуковых импульсов:

- 1) размер частиц МК ≤ 45 мкм;
- 2) массовое соотношение NaOH к концентрату $\geq 1,4:1$;
- 3) концентрацию NaOH ≥ 50 мас. %;
- 4) температуру ≥ 170 °С;
- 5) время ≥ 3 ч.

В оптимальных условиях эффективность выщелачивания при обычном перемешивании составляет ~84 %.

При воздействии ультразвуком эффективность выщелачивания достигается при:

- 1) размере частиц МК 54–63 мкм;
- 2) массовом соотношении NaOH к концентрату 1,4:1;
- 3) концентрации NaOH 50 мас. %;
- 4) температуре 140 °С;
- 5) времени 2 часа;
- 6) мощности ультразвуковых колебаний 720 Вт.

В оптимальных условиях эффективность выщелачивания с использованием ультразвука достигает 88,7 %.

Оптимальные условия выщелачивания МК двумя методами приведены в табл. 4.

Таблица 4. Сравнение параметров при обычном выщелачивании и применении ультразвуковых колебаний

Table 4. Comparison of parameters for conventional leaching and using ultrasonic vibrations

Метод Method	Условия/Conditions					
	Размер частиц, мкм Particle size, μm	NaOH:МК, мас. % NaOH:MC, wt %	С _{NaOH} , мас. % C _{NaOH} , wt %	t, °С	Время, ч Time, h	Мощность ультразвука, Вт Ultrasonic power, W
Перемешивание Stirring	≤ 45	1,5–2	50	170	3	0
Ультразвуковое выщелачивание Ultrasonic leaching	> 75	1,4	50	140	2	720
						Эффективность, % Efficiency, %
						~84
						~89

Оптимальные условия выщелачивания образцов массой 1000 г

На основании результатов ультразвукового выщелачивания в лабораторных условиях на образцах массой 100 г, выполнены исследования на образцах массой до 1000 г. Эксперименты проводили в емкости объемом 5,5 л, мощности ультразвуковых колебаний 1,8 кВт, мешалки 0,1–0,5 кВт и электронагревателя 3 кВт (рис. 9).

Эффективность выщелачивания образцов массой 1 кг как при обычном перемешивании, так и при выщелачивании с использованием ультразвука составила 50,74 и 63,96 % соответственно, т. е. с увеличением массы образца до 1 кг эффективность выщелачивания значительно снижается. Возможная причина этого в том, что при увеличении массы

образца реакционная смесь перемешивается неравномерно, что приводит к образованию «мертвых зон», в которых выщелачивание либо вообще не протекает, либо протекает медленно. Для повышения эффективности перемешивания и выщелачивания в схему установки внесли несколько усовершенствований:

- 1) изменили конструкцию лопастей мешалки, чтобы они располагались ближе к стенке и к дну емкости выщелачивания;
- 2) увеличили скорость перемешивания с ~60 до 120 об/мин;
- 3) добавили железные шарики (100 г Fe-шариков диаметром 3–6 мм на 1 кг МК);
- 4) увеличили мощность ультразвуковых импульсов с 720 до 900 Вт.

В результате степень выщелачивания как при обычном перемешивании, так и при использовании ультразвука возросла до 76,84 и 88,71 % соответственно.

При дальнейшей оптимизации условий ультразвукового выщелачивания образца неизмельченного МК массой 1 кг, в тех же условиях, что и концентрата с размером частиц 63–54 мкм, но при увеличении времени процесса с 2 до 3,5 час, эффективность выщелачивания достигла 80,91 %. Таким образом, при использовании ультразвуковых им-

пульсов оптимальными условиями выщелачивания образца массой 1 кг являются:

- размер частиц >75 мкм (неизмельченный МК);
- массовое соотношение раствор NaOH:МК 1,4:1;
- раствор NaOH с концентрацией 50 %;
- температура выщелачивания 140 °С;
- продолжительность выщелачивания 3,5 час;
- мощность импульсов 900 Вт, частота 20 кГц, продолжительность включения ультразвука 5 мин, продолжительность выключения 5 мин.

При проведении исследований с несколькими образцами массой 1 кг образовался нерастворимый остаток массой от 185,9 до 190,9 г. Остаток имел белый цвет и отличался от желто-коричневого цвета исходного МК. При сравнении рентгеновского спектра (XRD-метод) остатка (рис. 10) со спектром стандартного образца циркона показано, что нерастворимый остаток в основном состоит из циркона, а содержание монацита и других примесей незначительно. Химический состав нерастворимого остатка определяли химическими методами и ICP-OES-методом. Установлено, что содержание РЗЭ, U и Th в исходном МК, равное 44,81, 0,34 и 4,49 %, в нерастворимом остатке снизилось до 22,82, 0,22 и 1,93 %. РЗЭ, U и Th из МК выщелачиваются с достаточной полнотой – на 90,41, 88,28 и 91,93 % соответственно.

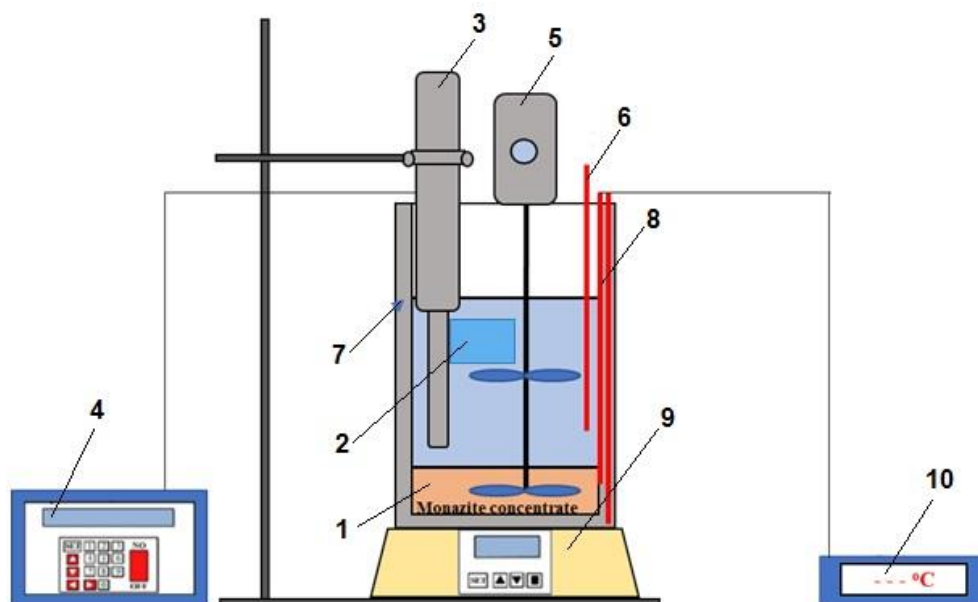


Рис. 9. Схема установки ультразвукового выщелачивания с использованием титанового ультразвукового излучателя: 1 – монацитовый концентрат; 2 – раствор NaOH; 3 – ультразвуковой излучатель; 4 – блок управления ультразвуковым излучателем; 5 – мешалка (мощность 0,1–0,5 кВт); 6 – термометр; 7 – рубашка для регулирования температуры; 8 – датчик температуры PT 100; 9 – электронагреватель (мощность 3 кВт); 10 – блок регистрации температуры

Fig. 9. Scheme of an ultrasonic leaching installation using a titanium ultrasonic emitter: 1 – monazite concentrate; 2 – NaOH solution; 3 – ultrasonic emitter; 4 – ultrasonic emitter control unit; 5 – mixer (power 0,1–0,5 kW); 6 – thermometer; 7 – shirt for temperature regulation; 8 – temperature sensor PT 100; 9 – electric heater (power 3 kW); 10 – temperature recording block

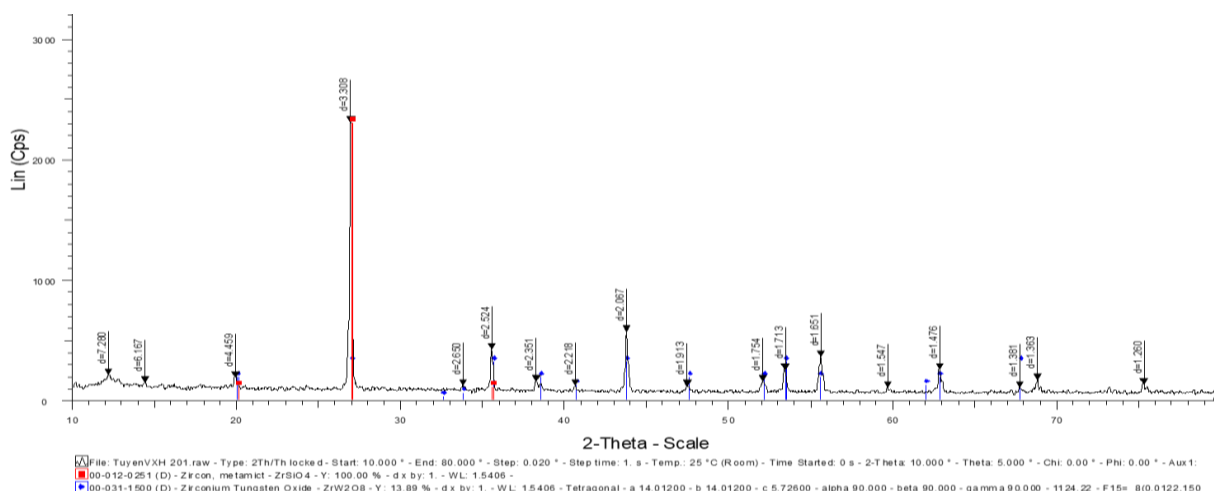


Рис. 10. Спектр рентгеновской дифракции нерастворимого остатка
Fig. 10. X-ray diffraction spectrum of the insoluble residue

Получение очищенного раствора хлоридов РЗЭ

После определения оптимальных условий выщелачивания образцов массой 1 кг нерастворимый остаток гидроксидов полностью растворяли в HCl и получали хлоридный раствор, который направляли на дальнейшую переработку. Полученный раствор нейтрализовывали раствором NaOH с концентра-

цией 20 г/л до pH=1–2. Затем раствор фильтровали, а очищенный от взвеси раствор хлоридов РЗЭ направляли на переработку. Суммарный объем раствора хлоридов РЗЭ составил ~3 л. Схема получения раствора хлоридов РЗЭ представлена на рис. 11).



Рис. 11. Схема получения раствора хлоридов РЗЭ
Fig. 11. Scheme for the synthesis of a solution of rare earth chlorides

Заключение

Показано, что при увеличении массы образцов от 100 г до 1 кг при проведении ультразвукового выщелачивания в 50 %-ном растворе в NaOH можно:

- увеличить размер частиц с 54–63 до >75 мкм, т. е. применять неизмельченный монацитовый концентрат);
- повысить мощность ультразвуковых импульсов с 720 до 900 Вт;
- использовать оптимальное массовое соотношение 50 %-ного раствора NaOH к концентрату, равное 1,4:1, при температуре 140 °С;
- увеличить продолжительность выщелачивания с 2 до 3,5 ч.

Эффективность выщелачивания редкоземельных элементов, U и Th достигает 90,41, 82,28 и 91,93 % соответственно. Для увеличения степени извлечения редкоземельных элементов, U и Th из

нерастворимого остатка его растворяли в 36%-й HCl и затем кислотность корректировали до pH=1–2 раствором NaOH с концентрацией 20 г/л и направляли на дальнейшую переработку.

Результаты исследований показывают, что ультразвук высокой интенсивности значительно повышает эффективность выщелачивания монацитового концентрата по сравнению с традиционными методами. Кроме того, при использовании ультразвука улучшаются условия измельчения и выщелачивания частиц в растворе NaOH. Полученные результаты показывают преимущества и потенциальные возможности технологии ультразвукового выщелачивания в щелочных растворах. В дальнейшем предложенный метод может заменить традиционное выщелачивание при создании промышленных процессов вскрытия и переработки монацитового концентрата во Вьетнаме и привлечь инвестиции для проведения дальнейших исследований.

СПИСОК ЛИТЕРАТУРЫ

1. Processing of Korean monazite concentrate for the recovery of rare earth metals (REMs) / A. Kumari, M.K. Jha, J. Hait, S.K. Sahu, V. Kumar // *Journal of the Indian Chemical Society*. – 2013. – Vol. 90. – № 11. – P. 2105–2110.
2. Разработка нового метода выделения редкоземельных элементов, урана и тория из монацитового концентрата / С.А. Куликова, М.Д. Самсонов, С.Е. Винокуров, Е.А. Тюпина // *Успехи в химии и химической технологии*. – 2014. – Т. 28. – № 6 (155). – С. 89–91.
3. Косынкин В.Д., Трубаков Ю.М., Сарычев Г.А. Прошлое и будущее редкоземельного производства в России // *Евразийское Научное Объединение*. – 2015. – Т. 1. – № 6 (6). – С. 49–60. URL: <https://www.elibrary.ru/item.asp?id=23715462> (дата обращения: 15.06.2024).
4. Mineral commodity summaries 2024 // U.S. Geological Survey, Reston, VA, Report 2024. – 212 p. DOI: 10.3133/mcs2024.
5. Муслимова А.В. Извлечение редкоземельных элементов из монацитового концентрата: дис. ... канд. техн. наук. – Северск, 2019. – 190 с.
6. Чантурия В.А., Николаев А.И., Александрова Т.Н. Инновационные экологически безопасные процессы извлечения редких и редкоземельных элементов из комплексных руд сложного вещественного состава // *Геология рудных месторождений*. – 2023. – Т. 65. – № 5. – С. 402–415. DOI: 10.31857/S0016777023050040.
7. Локшин Э.П., Тареева О.А. Разработка технологий извлечения редкоземельных элементов при сернокислотной переработке хибинского апатитового концентрата на минеральные удобрения / под ред. П.Б. Громова. – Апатиты: КНЦ РАН, 2015. – 268 с.
8. Генезис Катугинского редкометалльного месторождения: магматизм против метасоматоза / Е.В. Складов, Д.П. Гладкочуб, А.Б. Котов, А.Е. Старикова, В.В. Шарыгин, С.Д. Великославинский, А.М. Ларин, А.М. Мазукабзов, Е.В. Толмачева, Е.А. Хромова // *Тихоокеанская геология*. – 2016. – Т. 35. – № 3. – С. 9–22.
9. Ломаев В.Г., Сердюк С.С. Чукотское месторождение ниобий-редкоземельных руд – приоритетный объект для модернизации редкометалльной промышленности России // *Журнал Сибирского федерального университета. Техника и технологии*. – 2011. – Т. 2. – № 4. – С. 132–154.
10. Николаев А.И., Калинин В.Т. Попутное производство редкоземельных металлов при переработке перовскитового концентрата Африканского месторождения // *Цветные металлы*. – 2013. – № 3. – С. 64–69.
11. Металлоносность бурых углей Райчихинского месторождения (Приамурье, Дальний восток): условия накопления, распределения, перспективы освоения (обзор) / А.П. Сорокин, О.А. Агеев, С.В. Дугин, А.А. Попов // *Химия твердого топлива*. – 2023. – № 1. – С. 13–31.
12. Treatment of monazite by organic acids II: rare earth dissolution and recovery / D.E. Lazo, L.G. Dyer, R.D. Alorro, R. Browner // *Hydrometallurgy*. – 2018. – Vol. 179. – P. 94–99. DOI: 10.1016/j.hydromet.2018.05.022
13. Алексеев С.В., Зайцев В.А. Торий в ядерной энергетике. – М.: Техносфера, 2014. – 288 с.
14. Abdel-Rehim A.M. An innovative method for processing Egyptian monazite // *Hydrometallurgy*. – 2002. – Vol. 67. – № 1–3. – P. 9–17. DOI: 10.1016/S0304-386X(02)00134-2.
15. Краснотуфимский монацит как сырье для производства редкоземельных элементов и удобрений / А.В. Вальков, В.В. Сергиевский, С.И. Степанов, А.М. Чекмарев // *Цветные металлы*. – 2012. – № 3. – С. 21–23.
16. Leaching of rare earth metals (REMs) from Korean monazite concentrate / R. Panda, A. Kumari, M.K. Jha, J. Hait, V. Kumar, J.R. Kumar, J.Y. Lee // *Journal of industrial and engineering chemistry*. – 2014. – Vol. 20. – № 4. – P. 2035–2042. DOI: 10.1016/j.jiec.2013.09.028.
17. Zhao J., Pan F., Liu H. An environmental friendly Na₂CO₃-roasting decomposition strategy for the mixed rare earth concentrate // *Separation and Purification Technology*. – 2016. – Vol. 168. – P. 161–167. DOI: 10.1016/j.seppur.2016.05.036.

18. Modified acidic leaching for selective separation of thorium, phosphate and rare earth concentrates from Egyptian crude monazite // E.H. Borai, M.S. Abd El-Ghany, I.M. Ahmed, M.M. Hamed, A.S. El-Din, H.F. Aly // *International Journal of Mineral Processing*. – 2016. – Vol. 149. – P. 34–41. DOI: 10.1016/j.minpro.2016.02.003.
19. Processing of monazite leach liquor for the recovery of light rare earth metals (LREMs) / A. Kumari, S. Jha, J.N. Patel, S. Chakravarty, M.K. Jha, D.D. Pathak // *Minerals Engineering*. – 2018. – Vol. 129. – P. 9–14. DOI: 10.1016/j.mineng.2018.09.008.
20. Investigation of Vietnamese monazite concentrate decomposition by alkaline (KOH) baking method / Thi Hoang Xuan, Men Nguyen Thi, Tuyen Hoang Thi, Tuyen Ngo Van, Nhuan Hoang // *Journal of Nuclear Science and Technology*. – 2022. – Vol. 12. – № 2. – P. 28–35. DOI: 10.53747/nst.v12i2.351.
21. Selective separation of yttrium and uranium from xenotime concentrate / H.A. Ibrahim, M.A. Gado, N.S. Awwad, W.M. Fathy // *Zeitschrift für anorganische und allgemeine Chemie*. – 2021. – Vol. 647. – Iss. 15. – P. 1568–1577. DOI: 10.1002/zaac.202100118.
22. High-efficiency leaching of chalcopyrite by ozone with ultrasonic promotion: kinetics and mechanism / D. Zhang, L. Fu, H. Liu, H. Li, S. Wang, M. Zhang, M. Zhu, L. Zhang // *Journal of Molecular Liquids*. – 2024. – Vol. 401. – P. 124682. DOI: 10.1016/S1003-6326(22)65825-4.
23. Sulfidation treatment of molten incineration fly ashes with Na₂S for zinc, lead and copper resource recovery / D. Kuchar, T. Fukuta, M.S. Onyango, H. Matsuda // *Chemosphere*. – 2007. – Vol. 67. – № 8. – P. 1518–1525. DOI: 10.1016/j.chemosphere.2006.12.014.
24. Recovery of valuable metals from spent lithium-ion batteries by ultrasonic-assisted leaching process / L. Li, L.Y. Zhai, X.X. Zhang, J. Lu, R.J. Chen, F. Wu, K. Amine // *Journal of Power Sources*. – 2014. – Vol. 262. – P. 380–385. DOI: 10.1016/j.jpowsour.2014.04.013.
25. Güngör H., Elik A. Comparison of ultrasound-assisted leaching with conventional and acid bomb digestion for determination of metals in sediment samples // *Microchemical Journal*. – 2007. – Vol. 86. – № 1. – P. 65–70. DOI: 10.1016/j.microc.2006.10.006.
26. Ultrasound-assisted extraction of rare-earth elements from carbonatite rocks / L.O. Diehl, T.L. Gatiboni, P.A. Mello, E.I. Muller, F.A. Duarte, E.M.M. Flores // *Ultrasonics Sonochemistry*. – 2018. – Vol. 40. – Part B. – P. 24–29. DOI: 10.1016/j.ultsonch.2017.04.012.
27. Ultrasound-assisted leaching of rare earth elements from phosphogypsum / S.F. Lütke, D. Pinto, L.C. Brudi, L.F.O. Silva, T.R.S. Cadaval, F.A. Duarte, N. Ahmad, A. Nawaz, G.L. Dotto // *Chemical Engineering and Processing – Process Intensification*. – 2023. – Vol. 191. – P. 109458. DOI: 10.1016/j.cep.2023.109458.
28. A comprehensive review on the ultrasound-enhanced leaching recovery of valuable metals: Applications, mechanisms and prospects / S. Bao, B. Chen, Y. Zhang, L. Ren, C. Xin, W. Ding, S. Yang, W. Zhang // *Ultrasonics Sonochemistry*. – 2023. – Vol. 98. – P. 106525. DOI: 10.1016/j.ultsonch.2023.106525.
29. Малькова М.Ю., Задиранов А.Н. Применение универсального ультразвукового реактора для переработки концентратов руд редкоземельных металлов // *Вестник РУДН. Серия: Инженерные исследования*. – 2019. – Т. 20. – № 1. – С. 20–27.
30. Акказина Н.Т. Распределение суммы редкоземельных элементов в исследуемой руде коры выветривания // *Научные основы и практика переработки руд и техногенного сырья: Материалы XXVIII Международн. научно-технич. конф. – Екатеринбург, 6–7 апреля 2023. – Екатеринбург: Типография ФортДиалог, 2023. – С. 201–206.*
31. Ультразвуковой проточный реактор: пат. № 2403085, Российская Федерация, CI; заявл. 23.04.2009; опубл. 10.11.2010, Бюл. № 31. – 9 с.
32. Аппарат ультразвуковой проточной обработки: пат. № 141803, Российская Федерация, U1; заявл. 26.02.2014; опубл. 10.06.2014. – 2 с.
33. A rational approach to processing cerium-containing REE materials / A.V. Nechaev, A.S. Sibilev, A.V. Smirnov, S.V. Shestakov, E.G. Polyakov // *Theoretical Foundations of Chemical Engineering*. – 2016. – Vol. 50 (5). – P. 863–866. DOI: 10.1134/S0040579516050171
34. Хмелев С.С. Повышение эффективности кавитационно-акустических воздействий на химико-технологические процессы в аппаратных системах с жидкой фазой значительной вязкости: автореф. дис. ... канд. техн. наук. – Бийск, 2011. – 23 с.

Информация об авторах

Хоанг Суан Тхи, магистр технических наук, главный исследователь, ведущий научный сотрудник, Институт технологии радиоактивных и редкоземельных элементов, Вьетнамский институт атомной энергии, Вьетнам, 11513, г. Ханой, ул. Ланг Ха, 48, Донг Да; hoangthi.hus@gmail.com; <https://orcid.org/0009-0006-5633-8651>

Хоанг Нхуан, доктор технических наук, соисследователь, Институт технологии радиоактивных и редкоземельных элементов, Вьетнамский институт атомной энергии, Вьетнам, 11513, г. Ханой, ул. Ланг Ха, 48, Донг Да; hoangnhuan2010@gmail.com; <https://orcid.org/0009-0002-6931-6540>

Нгуен Тхи Мен, бакалавр наук, научный сотрудник, Институт технологии радиоактивных и редкоземельных элементов, Вьетнамский институт атомной энергии, Вьетнам, 11513, г. Ханой, ул. Ланг Ха, 48, Донг Да; nguyenmen2910@gmail.com; <https://orcid.org/0009-0004-5682-3193>

Хоанг Тхи Туен, бакалавр наук, научный сотрудник, Институт технологии радиоактивных и редкоземельных элементов, Вьетнамский институт атомной энергии, Вьетнам, 11513, г. Ханой, ул. Ланг Ха, 48, Донг Да; hoangtuyencnxh@gmail.com; <https://orcid.org/0009-0008-7732-9783>

Нго Ван Туен, бакалавр наук, научный сотрудник, Институт технологии радиоактивных и редкоземельных элементов, Вьетнамский институт атомной энергии, Вьетнам, 11513, г. Ханой, ул. Ланг Ха, 48, Донг Да; atuyenzircon@gmail.com; <https://orcid.org/0009-0005-5544-5925>

Хоанг Ван Дук, бакалавр наук, научный сотрудник, Институт технологии радиоактивных и редкоземельных элементов, Вьетнамский институт атомной энергии, Вьетнам, 11513, г. Ханой, ул. Ланг Ха, 48, Донг Да; hoangvanduc11@gmail.com; <https://orcid.org/0009-0008-1199-510X>

Тран Нгок Ха, доктор технических наук, консультант, Институт технологии радиоактивных и редкоземельных элементов, Вьетнамский институт атомной энергии, Вьетнам, 11513, г. Ханой, ул. Ланг Ха, 48, Донг Да; Tranngocha.silicate@gmail.com; <https://orcid.org/0009-0003-8613-042X>

Вьонг Хуу Ань, бакалавр технических наук, техник, Институт технологии радиоактивных и редкоземельных элементов, Вьетнамский институт атомной энергии, Вьетнам, 11513, г. Ханой, ул. Ланг Ха, 48, Донг Да; vhuuanh82@gmail.com; <https://orcid.org/0009-0008-2140-5177>

Нгуен Хуу Дык, доктор технических наук, аналитик данных, Институт технологии радиоактивных и редкоземельных элементов, Вьетнамский институт атомной энергии, Вьетнам, 11513, г. Ханой, ул. Ланг Ха, 48, Донг Да; nghuuduc2001@yahoo.com; <https://orcid.org/0009-0002-3850-4477>

Хай Шон Ле, заведующий лабораторией Института технологии радиоактивных и редкоземельных элементов Вьетнамского института атомной энергии, Вьетнам, 11513, г. Ханой, ул. Ланг Ха, 48, Донг Да. son.hut2006@gmail.com; <https://orcid.org/0000-0003-2147-7425>

Владимир Александрович Карелин, доктор технических наук, профессор отделения ядерного топливного цикла Инженерной школы ядерных технологий, Национальный исследовательский Томский политехнический университет, Россия, 634050, г. Томск, пр. Ленина, 30. vakarelin@tpu.ru; <https://orcid.org/0000-0003-3433-2903>

Поступила в редакцию: 25.06.2024

Поступила после рецензирования: 03.07.2024

Принята к публикации: 09.07.2024

REFERENCES

1. Kumari A., Jha M.K., Hait J., Sahu S.K., Kumar V. Processing of Korean monazite concentrate for the recovery of rare earth metals (REMs). *Journal of the Indian Chemical Society*, 2013, vol. 90, no. 11, pp. 2105–2110.
2. Kulikova S.A., Samsonov M.D., Vinokurov S.E., Tyupina E.A. Development of a new method for isolating rare earth elements, uranium and thorium from monazite concentrate. *Advances in chemistry and chemical technology*, 2014, vol. 28, no. 6 (155), pp. 89–91. (In Russ.)
3. Kosynkin V.D., Trubakov Yu.M., Sarychev G.A. Past and future of rare earth production in Russia. *Eurasian Scientific Association*, 2015. vol. 1, no. 6 (6), pp. 49–60. (In Russ.)
4. Mineral commodity summaries 2024. *Mineral Commodity Summaries*. U.S. Geological Survey. Reston, VA, Report 2024. 212 p. DOI: 10.3133/mcs2024.
5. Muslimova A.V. *Extraction of rare earth elements from monazite concentrate*. Cand. Diss. Seversk, 2019. 190 p. (In Russ.)
6. Chanturia V.A., Nikolaev A.I., Alexandrova T.N. Innovative environmentally friendly processes for the extraction of rare and rare earth elements from complex ores of complex material composition. *Geology of ore deposits*, 2023, vol. 65, no. 5, pp. 81–87. DOI: 10.31857/S0016777023050040.
7. Lokshin E.P., Tareeva O.A. *Development of technologies for the extraction of rare earth elements during sulfuric acid processing of Khibiny apatite concentrate for mineral fertilizers*. Ed. by P.B. Gromov. Apatity, KSC RAS Publ., 2015. 268 p. (In Russ.)
8. Sklyarov E.V., Gladkochub D.P., Kotov A.B., Starikova A.E., Sharygin V.V., Velikoslavinsky S.D., Larin A.M., Mazukabzov A.M., Tolmacheva E.V., Khromova E.A. Genesis of the Katuginsky rare metal deposit: magmatism versus metasomatism. *Pacific Geology*, 2016, vol. 35, no. 3, pp. 9–22.
9. Lomaev V.G., Serdyuk S.S. The Chukotonskoe deposit of niobium-rare earth ores is a priority object for the modernization of the rare metal industry of Russia. *Journal of the Siberian Federal University. Equipment and technologies*, 2011, no. 4, pp. 132–154. (In Russ.)
10. Nikolaev A.I., Kalinnikov V.T. Associated production of rare earth metals during processing of perovskite concentrate from the Afrikanda deposit. *Non-ferrous metals*, 2013, no. 3, pp. 64–69.
11. Sorokin A.P., Ageev O.A., Dugin S.V., Popov A.A. Metal content of brown coals from the Raichikhinskoye deposit (Amur region, Far East): conditions of accumulation, distribution, development prospects (review). *Chemistry of Solid Fuel*, 2023, no. 1, pp. 13–31. DOI: 10.31857/S0023117723010097.
12. Lazo D.E., Dyer L.G., Alorro R.D., Browner R. Treatment of monazite by organic acids II: Rare earth dissolution and recovery. *Hydrometallurgy*, 2018, vol. 179, pp. 94–99. DOI: 10.1016/j.hydromet.2018.05.022
13. Alekseev S.V., Zaitsev V.A. *Thorium in nuclear energy*. Moscow, Tekhnosfera Publ., 2014. 288 p. (In Russ.)
14. Abdel-Rehim A.M. An innovative method for processing Egyptian monazite. *Hydrometallurgy*, 2002, vol. 67, no. 1–3, pp. 9–17. DOI: 10.1016/S0304-386X(02)00134-2.

15. Valkov A.V., Sergievsky V.V., Stepanov S.I., Chekmarev A.M. Krasnoufimsky monazite as a raw material for the production of rare earth elements and fertilizers. *Non-ferrous metals*, 2012, no. 3, pp. 21–23. (In Russ.). Available at: <https://www.rudmet.ru/journal/682/article/8862/> (accessed 31 May 2024).
16. Panda R., Kumari A., Jha M.K., Hait J., Kumar V., Kumar J.R., Lee J.Y. Leaching of rare earth metals (REMs) from Korean monazite concentrate. *Journal of industrial and engineering chemistry*, 2014, vol. 20, no. 4, pp. 2035–2042. DOI: 10.1016/j.jiec.2013.09.028.
17. Zhao J., Pan F., Liu H. An environmental friendly Na_2CO_3 -roasting decomposition strategy for the mixed rare earth concentrate. *Separation and Purification Technology*, 2016, vol. 168, pp. 161–167. DOI: 10.1016/j.seppur.2016.05.036.
18. Borai E.H., Abd El-Ghany M.S., Ahmed I.M., Hamed M.M., El-Din A.S., Aly H.F. Modified acidic leaching for selective separation of thorium, phosphate and rare earth concentrates from Egyptian crude monazite. *International Journal of Mineral Processing*, 2016, vol. 149, pp. 34–41. DOI: 10.1016/j.minpro.2016.02.003.
19. Kumari A., Jha S., Patel J.N., Chakravarty S., Jha M.K., Pathak D.D. Processing of monazite leach liquor for the recovery of light rare earth metals (LREMs). *Minerals Engineering*, 2018, vol. 129, pp. 9–14. DOI: 10.1016/j.mineng.2018.09.008.
20. Thi Hoang Xuan, Men Nguyen Thi, Tuyen Hoang Thi, Tuyen Ngo Van, Nhuan Hoang. Investigation of Vietnamese monazite concentrate decomposition by alkaline (KOH) baking method. *Journal of Nuclear Science and Technology*, 2022, vol. 12, no. 2, pp. 28–35. DOI: 10.53747/nst.v12i2.351.
21. Ibrahim H.A., Gado M.A., Awwad N.S., Fathy W.M. Selective separation of yttrium and uranium from xenotime concentrate. *Zeitschrift für anorganische und allgemeine Chemie*, 2021, vol. 647, Iss. 15, pp. 1568–1577. DOI: 10.1002/zaac.202100118.
22. Zhang D., Fu L., Liu H., Li H., Wang S., Zhang M., Zhu M., Zhang L. High-efficiency leaching of chalcopryrite by ozone with ultrasonic promotion: kinetics and mechanism. *Journal of Molecular Liquids*, 2024, vol. 401, pp. 124682. DOI: 10.1016/S1003-6326(22)65825-4.
23. Kuchar D., Fukuta T., Onyango M.S., Matsuda H. Sulfidation treatment of molten incineration fly ashes with Na_2S for zinc, lead and copper resource recovery. *Chemosphere*, 2007, vol. 67, no. 8, pp. 1518–1525. DOI: 10.1016/j.chemosphere.2006.12.014.
24. Li L., Zhai L.Y., Zhang X.X., Lu J., Chen R.J., Wu F., Amine K. Recovery of valuable metals from spent lithium-ion batteries by ultrasonic-assisted leaching process. *Journal of Power Sources*, 2014, vol. 262, pp. 380–385. DOI: 10.1016/j.jpowsour.2014.04.013.
25. Güngör H., Elik A. Comparison of ultrasound-assisted leaching with conventional and acid bomb digestion for determination of metals in sediment samples. *Microchemical Journal*, 2007, vol. 86, no. 1, pp. 65–70. DOI: 10.1016/j.microc.2006.10.006.
26. Diehl L.O., Gatiboni T.L., Mello P.A., Muller E.I., Duarte F.A., Flores E.M.M. Ultrasound-Assisted Extraction of Rare-Earth Elements from Carbonatite Rocks. *Ultrasonics Sonochemistry*, 2018, vol. 40, part B, pp. 24–29. DOI: 10.1016/j.ulsonch.2017.04.012.
27. Lütke S.F., Pinto D., Brudi L.C., Silva L.F.O., Cadaval T.R.S., Duarte F.A., Ahmad N., Nawaz A., Dotto G.L. Ultrasound-assisted leaching of rare earth elements from phosphogypsum. *Chemical Engineering and Processing – Process Intensification*, 2023, vol. 191, pp. 109458. DOI: 10.1016/j.cep.2023.109458.
28. Bao S., Chen B., Zhang Y., Ren L., Xin C., Ding W., Yang S., Zhang W. A comprehensive review on the ultrasound-enhanced leaching recovery of valuable metals: Applications, mechanisms and prospects. *Ultrasonics Sonochemistry*, 2023, vol. 98, pp. 106525. DOI: 10.1016/j.ulsonch.2023.106525.
29. Malkova M.Yu., Zadiranov A.N. Application of a universal ultrasonic reactor for processing concentrates of rare earth metal ores. *Bulletin of the Peoples' Friendship University of Russia. Series: engineering research*, 2019, vol. 20, no. 1, pp. 20–27. DOI: 10.22363/2312-8143-2019-20-1-20-27.
30. Akkazina N.T. Distribution of the sum of rare earth elements in the studied weathering crust ore. Scientific foundations and practice of processing ores and technogenic raw materials. *Materials of the XXVIII International Scientific and Technical Conference*. April 6–7, 2023. Ekaterinburg, Typography FortDialog Publ. House, 2023. pp. 201–206. (In Russ.).
31. Borisov Yu.A., Leonov G.V., Khmelev V.N., Abramenko D.S., Khmelev S.S., Shalunov A.V. *Ultrasonic flow reactor*. Patent RF, no. 2403085, 2010. (In Russ.).
32. Khmelev V.N., Levin S.V., Khmelev S.S., Tsyganok S.N., Kuzovnikov Yu.M. *Ultrasonic flow treatment device*. Patent RF, no. 141803, 2014. (In Russ.).
33. Nechaev A.V., Sibilev A.S., Smirnov A.V., Shestakov S.V., Polyakov E.G. A rational approach to processing cerium-containing REE materials. *Theoretical Foundations of Chemical Engineering*, 2016, vol. 50 (5), pp. 863–866. DOI: 10.1134/S0040579516050171.
34. Khmelev S.S. *Increasing the efficiency of cavitation-acoustic influences on chemical technological processes in hardware systems with a liquid phase of significant viscosity*. Cand. Diss. Abstract. Biysk, 2011. 23 p. (In Russ.).

Information about the authors

Hoang Xuan Thi, Master of Technical Sciences, Principal Investigator, Lead Researcher, Vietnam Atomic Energy Institute, 48, street Lang Ha, Dong Da, Hanoi, 11513, Vietnam; hoangthi.hus@gmail.com; <https://orcid.org/0009-0006-5633-8651>

Hoang Nhuan, Dr. Sc., Co-Investigator, Vietnam Atomic Energy Institute, 48, street Lang Ha, Dong Da, Hanoi, 11513, Vietnam; hoangnhuan2010@gmail.com; <https://orcid.org/0009-0002-6931-6540>

Nguyen Thi Men, Bachelor of Science, Researcher, Vietnam Atomic Energy Institute, 48, street Lang Ha, Dong Da, Hanoi, 11513, Vietnam; nguyenmen2910@gmail.com; <https://orcid.org/0009-0004-5682-3193>

Hoang Thi Tuyen, Bachelor of Science, Researcher, Vietnam Atomic Energy Institute, 48, street Lang Ha, Dong Da, Hanoi, 11513, Vietnam; hoangtuyencnxh@gmail.com; <https://orcid.org/0009-0008-7732-9783>

Ngo Van Tuyen, Bachelor of Science, Researcher, Vietnam Atomic Energy Institute, 48, street Lang Ha, Dong Da, Hanoi, 11513, Vietnam; atuyenzircon@gmail.com; <https://orcid.org/0009-0005-5544-5925>

Hoang Van Duc, Bachelor of Science, Researcher, Vietnam Atomic Energy Institute, 48, street Lang Ha, Dong Da, Hanoi, 11513, Vietnam; hoangvanduc11@gmail.com; <https://orcid.org/0009-0008-1199-510X>

Tran Ngoc Ha, Dr. Sc., Consultant, Vietnam Atomic Energy Institute, 48, street Lang Ha, Dong Da, Hanoi, 11513, Vietnam; Tranngocha.silicate@gmail.com; <https://orcid.org/0009-0003-8613-042X>

Vuong Huu Anh, Bachelor of Technical Sciences, Technician, Vietnam Atomic Energy Institute, 48, street Lang Ha, Dong Da, Hanoi, 11513, Vietnam; vhuuanh82@gmail.com; <https://orcid.org/0009-0008-2140-5177>

Nguyen Huu Duc, Dr. Sc., Data Analyst, Vietnam Atomic Energy Institute, 48, street Lang Ha, Dong Da, Hanoi, 11513, Vietnam; nghuuduc2001@yahoo.com; <https://orcid.org/0009-0002-3850-4477>

Son H. Le, Head of the Laboratory, Vietnam Atomic Energy Institute, 48, street Lang Ha, Dong Da, Hanoi, 11513, Vietnam; son.hut2006@gmail.com; <https://orcid.org/0000-0003-2147-7425>

Vladimir A. Karelin, Dr. Sc., Professor, National Research Tomsk Polytechnic University, 30, Lenin avenue, Tomsk, 634050, Russian Federation; vakarelin@tpu.ru; <https://orcid.org/0000-0003-3433-2903>

Received: 25.06.2024

Revised: 03.07.2024

Accepted: 09.07.2024

УДК 622.24.062
DOI: 10.18799/24131830/2024/9/4761
Шифр специальности ВАК: 2.8.1

Буровой раствор для бурения многолетнемерзлых горных пород

А.Я. Третьяк✉, А.А. Чумаков, К.В. Кривошеев

Южно-Российский государственный политехнический университет (НПИ) имени М.И. Платова,
Россия, г. Новочеркасск

✉13050465@mail.ru

Аннотация. Актуальность. Дан обзор по проблеме бурения скважин на нефть и газ в условиях распространения многолетнемерзлых пород. При сооружении скважин различного назначения в условиях залегания многолетнемерзлых горных пород к выбору оптимального бурового раствора предъявляются особые требования. Месторождения зоны вечной мерзлоты имеют существенные отличия от условий, где горные породы имеют положительную температуру. **Цель.** Для условий залегания многолетнемерзлых пород выбор оптимальной технологии бурения играет важную роль. Температура бурового раствора в процессе бурения должна быть равна температуре разбуриваемых пород или быть чуть ниже. **Методы.** Выполнен анализ типов промывочных агентов, используемых для бурения многолетнемерзлых пород, рассмотрены основные технологии, применяемые при этом. Дано описание разработанной промывочной жидкости, определен оптимальный ее состав. **Результаты и выводы.** Поставленные задачи решаются с помощью разработки безглинистого полимерного бурового раствора с антиморозными добавками, который имеет температуру замерзания минус 7 °С. Рассмотрены вопросы обратного промерзания скважин и применение, с целью улучшения терморегуляции скважин, термокейса. Изложен выбор теплоизоляционного оборудования на основе прогнозирования температурного изменения свойств горных пород. Показано, что обратное промерзание горных пород при строительстве нефтяных и газовых скважин приводит к появлению негерметичности и смятию обсадных колонн, примерзанию обсадных колонн к стенкам скважины, недоспуску колонн до заданной проектной глубины. Приведена формула, позволяющая определить давление, при котором напряжение в обсадных трубах достигнет предела текучести и происходит смятие обсадных колонн. Показана схема гидратации ионов предлагаемого бурового раствора с многолетнемерзлыми породами и основные причины осложнений. С помощью лабораторных исследований определен оптимальный состав бурового раствора. Внедрение предлагаемого бурового раствора в практику бурения многолетнемерзлых пород позволит успешно сооружать нефтегазовые скважины.

Ключевые слова: многолетнемерзлые породы, бурение скважин, буровой раствор, промывка, морозостойкие добавки, температура замерзания, термокейс

Для цитирования: Третьяк А.Я., Чумаков А.А., Кривошеев К.В. Буровой раствор для бурения многолетнемерзлых горных пород // Известия Томского политехнического университета. Инжиниринг георесурсов. – 2024. – Т. 335. – № 9. – С. 24–30. DOI: 10.18799/24131830/2024/9/4761

UDC 622.24.062
DOI: 10.18799/24131830/2024/9/4761

Drilling fluid for drilling permafrost rocks

A.Ya. Tretyak✉, A.A. Chumakov, K.V. Krivosheev

South Russian State Polytechnic University (NPI) named after M.I. Platov, Novocherkassk, Russian Federation

✉13050465@mail.ru

Abstract. Relevance. The article provides an overview of the problem of drilling wells for oil and gas in conditions of permafrost. When constructing wells for various purposes in conditions of permafrost rocks, special requirements are imposed on the selection of the optimal drilling fluid. Deposits in the permafrost zone have significant differences from conditions where rocks have a positive temperature. **Aim.** For permafrost conditions, the choice of optimal drilling technology plays an im-

portant role. The temperature of the drilling fluid during drilling should be equal to the temperature of the rocks being drilled or be slightly lower. **Methods.** An analysis of the types of flushing agents used for drilling permafrost has been carried out, and the main technologies used in this case have been considered. A description of the developed flushing liquid is given, and its optimal composition is determined. **Results and conclusions.** The objectives are solved by developing a clay-free polymer drilling fluid with antifreeze additives, which has a freezing point of minus 7°C. The paper considers the issues of reverse freezing of wells and the use of a thermal case in order to improve the thermal regulation of wells. The choice of thermal insulation equipment is outlined based on predicting temperature changes in the properties of rocks. It was shown that reverse freezing of rocks during the construction of oil and gas wells leads to leaks and collapse of casing columns, freezing of casing columns to the walls of the well, and failure of columns to reach a given design depth. The paper introduces the formula to determine the pressure, at which the stress in the casing reaches the yield point and collapse of the casing occurs. The article shows the diagram of the hydration of ions of the proposed drilling fluid with permafrost and the main causes of complications. Using the laboratory studies, the optimal composition of the drilling fluid was determined. The introduction of the proposed drilling fluid into the practice of permafrost drilling will make it possible to successfully construct oil and gas wells.

Keywords: permafrost rocks, well drilling, drilling mud, flushing, frost additives, freezing point, thermal case

For citation: Tretyak A.Ya., Chumakov A.A., Krivosheev K.V. Drilling fluid for drilling permafrost rocks. *Bulletin of the Tomsk Polytechnic University. Geo Assets Engineering*, 2024, vol. 335, no. 9, pp. 24–30. DOI: 10.18799/24131830/2024/9/4761

Введение

Многолетнемерзлые породы (ММП) составляют основную массу криолитозоны, распространены в основном в Северном полушарии Земли и занимают порядка 65 % территории России. ММП – это породы, которые постоянно находятся в условиях отрицательных температур. Известно, что температура мерзлоты изменяется от минус 3 °С до минус 7 °С. В ММП кристаллы льда заполняют всё поровое пространство [1–6].

При сооружении скважин в интервале распространения ММП буровой раствор, имеющий положительную температуру замерзания, легко размывает ММП и это приводит к интенсивному кавернообразованию, обвалу стенок скважины, осыпям горных пород. В соответствии с вышеизложенным возникает острая необходимость в использовании при бурении скважин бурового раствора, который не замерзал бы при температуре до минус 7 °С.

Бурение скважин в зоне распространения ММП отличается от аналогов, расположенных в районах с положительной температурой. Влияние на технологию бурения скважины оказывают одновременно горно-геологические, горнотехнические, мерзлотные и климатические факторы. Осложнения, возникающие при проходке ММП, обуславливаются температурным фактором, который возникает на контакте резцов долота с горным массивом. При этом происходит таяние мерзлых пород, что в конечном счете приводит к осложнениям и авариям. Колебания теплового режима приводят к изменению прочности ММП, так как часть воды переходит из твердого состояния (лёд) в жидкое (вода). Лёд является основным компонентом ММП. В процессе бурения мерзлых пород механическая энергия превращается в тепловую, которая нагревает долото и окружающие ствол скважины горные породы, что оказывает влияние на целостность ствола скважины и свойства бурового раствора. Таким обра-

зом, вышеобозначенные проблемы являются актуальными в настоящее время [7–13].

Преимущества и недостатки способов сооружения скважин в ММП представлены ниже.

Способ сооружения скважин с промывкой охлажденным буровым раствором имеет преимущество – отсутствие проблемы в использовании, и недостаток – большая стоимость оборудования.

Способ сооружения скважин с применением газожидкостных смесей имеет преимущества: низкую теплопроводность, экономичность, увеличение скорости бурения и проходки на долото, сокращение прихватов, и недостаток – необходимость дополнительного оборудования, так как при отрицательных температурах пена замерзает.

Способ сооружения скважин с продувкой воздухом имеет преимущество – возможность регулирования температуры, и недостаток: необходимость дополнительного оборудования, дороговизна применения технологии, ухудшение условий очистки скважины при остановке циркуляции.

Способ сооружения скважин с применением бурового раствора, имеющего в своём составе специальные добавки, имеет преимущества: возможность регулирования температуры подаваемого в скважину бурового раствора, простота использования, и недостатки: пониженная экологичность, дополнительные затраты на химреагенты.

Способ сооружения скважин с понижением температуры жидкости при использовании твердых хладагентов, находящихся в буровом растворе, имеет такие преимущества, как простота в использовании, и недостатки: повышенный расход хладагентов, высокая стоимость.

Способ сооружения скважин с помощью термокейсов имеет преимущество – высокая степень защиты от обратного промерзания, и недостаток – высокая стоимость сооружения скважин.

Аналитические исследования

Оценивая вышеописанные способы очистки, необходимо отметить, что наиболее оптимальным является способ бурения ММП с применением бурового раствора, имеющего в своем составе специальные добавки, понижающие температуру замерзания [14–20].

Исходя из вышеизложенного, необходимо отметить, что для уменьшения скорости оттаивания ММП в процессе сооружения скважин на нефть и газ необходима разработка буровых растворов с низкой температурой замерзания, теплоёмкостью и теплопроводностью при сохранении высоких реологических характеристик. Таким требованиям могут удовлетворять полимерные растворы с добавлением морозостойких химических реагентов [1].

Решение проблемы осложнений, возникающих в результате растепления околоствольной зоны ММП, состоит, с одной стороны, в учете этого явления при выборе прочностных характеристик обсадных колонн при расчете их на смятие внешним давлением, а с другой – в предотвращении этого явления путем регулирования температуры нагнетаемого в скважину бурового раствора до значений, близких к температуре плавления льда, скрепляющего частицы ММП.

Обратное промерзание пород в случае простоя скважины при строительстве или прекращении эксплуатации приводит к появлению негерметичности и смятию обсадных колонн; примерзанию при спускоподъемных операциях (СПО) обсадных колонн к стенке пробуренной скважины; недопуску колонны до заданной проектом глубины; недоподъёму цемента в скважине при цементировании.

Основной принцип управляемой разгрузки избыточного давления промерзания можно записать в следующем виде [6]:

$$P_{см/пк} > P_{тек/пр.к} + P_{рмп},$$

где $P_{см/пк}$ – допустимое наружное давление смятия последующей колонны, МПа; $P_{рмп}$ – давление разрыва мерзлой породы, МПа; $P_{тек/пр.к}$ – давление, при котором напряжение в теле обсадной трубы предыдущей колонны достигает предела текучести (в МПа), определяемое по формуле:

$$P_{тек/пр.к} = K \cdot 2n \cdot G_{тек} \cdot D,$$

где $K=0,875$ – коэффициент, учитывающий отклонение толщины стенки обсадной трубы; $G_{тек}$ – напряжение предела текучести стали, МПа; D – наружный диаметр обсадной трубы, мм; n – толщина стенки обсадной трубы, мм.

Выбор прочностных характеристик обсадных труб предыдущей и последующей колонны осуществляется с учетом условия:

$$P_{см/пк} > P_{тек/пр.к}.$$

Если условия неравенства будут выполнены, прочностные характеристики спроектированных колонн соответствуют необходимым минимальным требованиям и колонну не сомнет.

Для бурения ММП предлагается использовать буровой раствор, состоящий из: структурообразователя – мраморная крошка – CaO – 2–5 %, ПАЦ – 2–5 %, химреагентов, снижающих температуру замерзания и ингибирующих стенки скважины, – пропиленгликоль – 1–5 %, хлорид кальция – 1–4 %, морозол 2 – 1–5 %, хлорид калия – 1–4 %, поверхностно-активное вещество – ПАВ-ОП-10 – 2–5 %.

Химическая обработка буровых растворов является основным средством регулирования их свойств, корректировка которых очень важна при бурении ММП. При этом растворам необходимо придать, с помощью химреагентов, необходимые свойства. Используемые буровые растворы должны обрабатываться доступными и дешёвыми химическими реагентами.

На рис. 1 представлена схема взаимодействия стенок ММП с предлагаемым раствором. При использовании такого бурового раствора происходит ионизация ионов хлорида кальция и хлористого калия из бурового раствора на стенки скважины и, как результат, будет происходить уменьшение плавления льда стенок скважины.

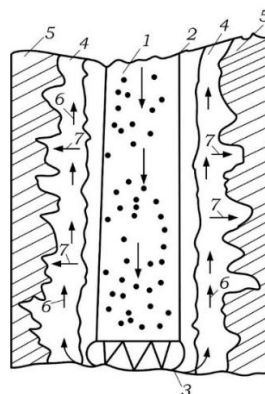


Рис. 1. Схема гидратации ионов бурового раствора: 1 – буровой раствор, 2 – буровая колонна, 3 – буровое долото, 4 – зона таяния ММП, 5 – ММП, 6 – направление движения бурового раствора, 7 – направление гидратации ионов

Fig. 1. Scheme of drilling fluid ion hydration: 1 – drilling mud, 2 – drill string, 3 – drill bit, 4 – MMP melting zone, 5 – MMP, 6 – direction of drilling mud movement, 7 – direction of ions hydration

Еще одна причина растепления ММП – попадание фильтрата бурового раствора (воды) в мерзлую породу. Предлагаемый раствор содержит ПАЦ в количестве до 5 %, что позволяет получить водоотдачу раствора до 3 см^3 за 30 минут.



Рис. 2. Схема основных причин осложнений при бурении скважин в ММП

Fig. 2. Diagram of the main causes of complications during drilling in MMP

Вследствие изменения агрегатного состояния грунта происходят прихваты бурового снаряда, смятие обсадных колонн, замерзание бурового раствора, некачественное цементирование, льдистые породы уменьшаются в объеме, создаются пустоты по стволу скважины и приустевые воронки.

Для эффективного бурения ММП необходимо использовать в качестве очистного агента буровой раствор с отрицательной температурой замерзания.

В соответствии с проектом на бурение скважин в условиях залегания ММП, чаще всего второй колонной, называемой кондуктором, необходимо перекрыть весь интервал мёрзлых пород, залегающий в интервале от 0 до ориентировочно 700 м. В этом интервале и происходят основные осложнения.

Схема основных причин осложнений, возникающих при бурении скважин в ММП, показана на рис. 2.

Бурение ствола в интервале ММП необходимо выполнять в форсированном режиме, применяя наиболее оптимальные типы долот. При бурении мерзлых горных пород промывочной жидкостью с положительной температурой необходимо добиваться максимального сокращения времени контакта жидкости со стенками скважины.

С целью определения оптимальных параметров буровых растворов были приготовлены растворы, состоящие из следующих химреагентов.

1) мас. %: мраморная крошка – 5, ПАЦ – 5, пропиленгликоль – 5, морозол 2 – 5, хлорид калия – 4, ПАВ-ОП-10 – 5, хлорид кальция – 4, остальное – вода. Параметры раствора следующие: плотность 1,22 г/см³, вязкость 22 с, водоотдача 3,0 см³/30 мин, температура замерзания – 7 °С.

- 2) мас. %: мраморная крошка – 5, ПАЦ – 4, пропиленгликоль – 4, морозол 2 – 4, хлорид калия – 3, ПАВ-ОП-10 – 4, хлорид кальция – 3, остальное – вода. Параметры раствора следующие: плотность 1,19 г/см³, вязкость 22 с, водоотдача 4,1 см³/30 мин, температура замерзания – 5,5 °С.
- 3) мас. %: мраморная крошка – 5, ПАЦ – 3, пропиленгликоль – 3, морозол 2 – 3, хлорид калия – 2, ПАВ-ОП-10 – 3, хлорид кальция – 2, остальное – вода. Параметры раствора следующие: плотность 1,14 г/см³, вязкость 21 с, водоотдача 5,2 см³/30 мин, температура замерзания – 3,5 °С.
- 4) мас. %: мраморная крошка – 5, ПАЦ – 2, пропиленгликоль – 1, морозол 2 – 1, хлорид калия – 1, ПАВ-ОП-10 – 2, хлорид кальция – 1, остальное – вода. Параметры раствора следующие: плотность 1,1 г/см³, вязкость 21 с, водоотдача 6,1 см³/30 мин, температура замерзания – 1 °С.

Оптимальным оказался раствор № 1, имеющий состав: мраморная крошка – 5 %, ПАЦ – 5 %, пропиленгликоль – 5 %, морозол 2 – 5 %, хлорид калия – 4 %, ПАВ-ОП-10 – 5 %, хлорид кальция – 4 %, остальное – вода. Температура замерзания такого раствора составила минус 7 °С. Влияние химических реагентов на температуру замерзания бурового раствора показано на рис. 3.

Выполненные экспериментальные исследования позволили подобрать оптимальный состав бурового раствора, состоящий из: мраморной крошки, ПАЦ, пропиленгликоля, морозола, хлорида калия, ПАВ-ОП-10, хлористого калия, остальное вода и рекомендовать его для бурения скважин в ММП.

Синергетика антиморозных добавок подтверждается выполненными лабораторными работами.

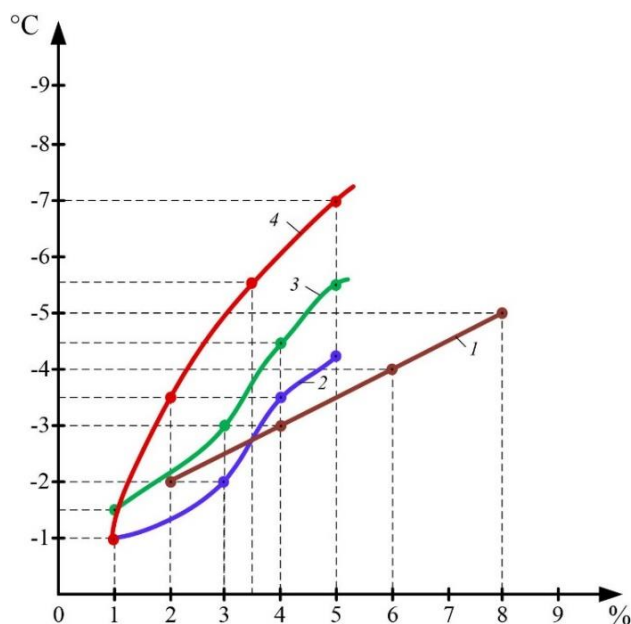


Рис. 3. Влияние содержания солей KCl и CaCl₂, морозола 2 и полигликоля на температуру заморозания бурового раствора: 1 – хлорид кальция и хлорид калия; 2 – морозол 2; 3 – полигликоль; 4 – заявленный раствор

Fig. 3. Impact of KCl and CaCl₂ salts, morosol and polyglycol content on drilling mud freezing point: 1 – calcium chloride and potassium chloride; 2 – morosol 2; 3 – polyglycol; 4 – declared solution

В процессе выполнения лабораторных работ удалось добиться синергетического эффекта от применения предлагаемых химреагентов и получить буровой раствор, имеющий температуру заморозания минус 7 градусов по Цельсию.

На разработанный с низкой температурой заморозания безглинистый буровой раствор подана заявка на изобретение.

Выводы и рекомендации

1. На основе анализа современного состояния технологии бурения нефтегазовых скважин в ММП выявлены основные проблемы, связанные с технологией бурения.
2. Применение предлагаемого бурового раствора для бурения многолетнемерзлых горных пород будет способствовать образованию прочной полимерглинистой корки, качественному структурообразованию, высокой термостойкости и солестойкости.
3. Проведенные исследования по оптимизации состава разработанного бурового раствора для криогенного бурения позволяют рекомендовать его для практического внедрения в полевых условиях.
4. Высокие реологические и пониженные растепляющие свойства бурового раствора будут способствовать повышению эффективности строительства нефтегазовых скважин в условиях Крайнего Севера.

СПИСОК ЛИТЕРАТУРЫ

1. Растворы для низкотемпературных условий бурения / А.Б. Тулубаев, И.А. Королева, А.М. Казанцева, Ж.С. Попова // Экспозиция Нефть Газ. – 2021. – № 6 (85). – С. 68–71. DOI: 10.24412/2076-6785-2021-6-68-71.
2. Рушков Д.Р., Злобин И.И., Закиров Н.Н. Температурное влияние буровых растворов на многолетнемерзлые породы // Булатовские чтения. – Краснодар, 2022. – Т. 1. – С. 444–445.
3. Иванов И.С. Исследование и разработка рецептур буровых растворов для снижения скорости процесса растепления многолетнемерзлых пород при строительстве скважин. Нефтяная смена. Энергия будущего!: Материалы VIII Всероссийской научно-практической конференции. – Красноярск: Сибирский федеральный университет, 2022. – С. 149–150.
4. Разработка и исследование низкотоксичных базовых жидкостей инвертно-эмульсионных буровых растворов для бурения на шельфе / В.Л. Заворотный, К.А. Стародубцева, А.А. Запорожская, К.И. Запорожский, С.А. Дуннев, Д.Н. Сидоров, А.В. Балеевских // Нефть. Газ. Новации. – 2022. – № 4 (257). – С. 22–28.
5. Третьяк А.Я., Кривошеев К.В., Полтораки М.Н. Химические реагенты для буровых растворов на водной основе при низкотемпературных условиях бурения скважин // Актуальные проблемы недропользования-2023: Материалы Международной научно-практической конференции. – Новочеркасск, 27 октября 2023. – Новочеркасск: Южно-Российский государственный политехнический университет (НПИ) имени М.И. Платова, 2024. – С. 208–214.
6. Нормализация температурного режима скважин при бурении по многолетнемерзлым породам с очисткой забоя воздухом / А.Н. Дмитриев, М.Е. Будовская, И.В. Мильвит, Н.И. Леонко // Бурение и нефть. – 2023. – № S2. – С. 54–57.
7. Рушков Д.Р., Закиров Н.Н. Сложности, возникающие при бурении в многолетнемерзлых породах // Булатовские чтения. – Краснодар, 2022. – Т. 1. – С. 442–443.
8. Перельгин К.О. Растепление многолетнемерзлых горных пород при бурении нефтяных и газовых скважин // Модели инновационных решений повышения конкурентоспособности отечественной науки: Сборник статей Всероссийской научно-практической конференции с международным участием. – Уфа, 13 апреля 2023. – Уфа: Общество с ограниченной ответственностью «Аэтерна», 2023. – С. 22–23.
9. Тулубаев А.Б. Разработка и исследование компонентов бурового раствора для низкотемпературных условий бурения // Технологические решения строительства скважин на месторождениях со сложными геолого-технологическими условиями их разработки: материалы II международной научно-практической конференции, посвященной памяти Виктора Ефимовича Копылова. – Тюмень, 15–17 февраля 2022. – С. 292–296.
10. Кондренко О.С. Буровые растворы для вскрытия пластов в условиях многолетнемерзлых пород // Строительство нефтяных и газовых скважин на суше и на море. – 2009. – № 10. – С. 22–24.

11. Гасумов Р.А., Кондренко О.С., Гасумов Э.Р. Основные доминирующие факторы теплового воздействия на мерзлые породы при бурении скважин в криолитозонах // Вестник Северо-Кавказского государственного технического университета. – 2010. – № 2. – С. 5–12.
12. Полозков К.А., Басниев К.С., Гафтуняк П.И. Осложнения, возникающие при строительстве и эксплуатации скважин в зонах распространения многолетнемерзлых пород, и мероприятия по их предотвращению // Строительство нефтяных и газовых скважин на суше и на море. – 2010. – № 1. – С. 6–10.
13. Testing a mathematical model of thermohydraulic processes during drilling the wells under the permafrost conditions / A.V. Minakov, M.I. Pryazhnikov, A.L. Neverov, D.V. Guzei, A.S. Lobasov, V.A. Zhigarev // Interfacial Phenomena and Heat Transfer. – 2020. – Vol. 8. – № 3. – P. 235–247. DOI: 10.1615/InterfacPhenomHeatTransfer.2020035213.
14. Petrova L.V., Petrov A.N. The technology of opening and mining sites of complex occurrence of placer deposits in permafrost conditions // IOP Conference Series: Earth and Environmental Science: International Science and Technology Conference "EarthScience". – Russky Island, 10–12 December 2019. – Vol. 459. – № 4. – Ch. 3. – Russky Island: Institute of Physics Publishing, 2020. – # 042094. DOI: 10.1088/1755-1315/459/4/042094.
15. Physicochemical properties of potential low-temperature drilling fluids for deep ice core drilling / N. Liu, H. Xu, Y. Yang, L. Wang, P. Talalay, L. Han // Cold Regions Science and Technology. – 2016. – Vol. 129. – P. 45–50. DOI: 10.1016/j.coldregions.2016.06.004.
16. Vaganova N.A. Simulation of thermal stabilization of bases under engineering structures in permafrost zone // AIP Conference Proceedings: proceedings of the 44th International conference on applications of mathematics in engineering and economics: (AMEE'18). – Sozopol, Bulgaria, 08–12 June 2018. Vol. 2048. – Sozopol, Bulgaria: AIP Publishing, 2018. – # 030010. DOI 10.1063/1.5082068.
17. Prediction of permafrost changes in Northeastern China under a changing climate / Z. Wei, H. J. Jin, J.M. Zhang, S.P. Yu, R.X. He, X.L. Chang, X.J. Han, Y.J. Ji // Science China Earth Sciences. – 2011. – Vol. 54. – № 6. – P. 924–935. DOI: 10.1007/s11430-010-4109-6.
18. Zhang Z.Q., Wu Q.B. Thermal hazards prediction on Qinghai-Tibet Plateau permafrost region // Jilin Daxue Xuebao (Diqui Kexue Ban). – 2012. – Vol. 42. – № 2. – P. 454–461+484.
19. Numerical research of heat transfer processes at the drilling wells in permafrost rocks / A.V. Minakov, M.I. Pryazhnikov, E.I. Mikhienkova, A.L. Neverov, A.V. Mateev, A.V. Zhigarev, D.V. Guzei // Journal of Physics: Conference Series: XXXV Siberian Thermophysical Seminar, STS 2019. – Novosibirsk, 27–29 August 2019. – Vol. 1382. – Novosibirsk: Institute of Physics Publishing, 2019. – P. 012091. DOI: 10.1088/1742-6596/1382/1/012091.
20. Kamel A.H. A novel mud formulation for drilling operations in the permafrost // Society of Petroleum Engineers – SPE Western Regional. Pacific Section AAPG Joint Technical Conference 2013: Energy and the Environment Working Together for the Future. – Monterey, CA, 19–25 April 2013. – P. 252–261.

Информация об авторах

Александр Яковлевич Третьяк, доктор технических наук, профессор, заведующий кафедрой нефтегазовых техники и технологий, Южно-Российского государственного политехнического университета (НПИ) имени М.И. Платова, Россия, 346400, г. Новочеркасск, ул. Просвещения, 132; 13050465@mail.ru; <https://orcid.org/0000-0001-7362-5536>

Андрей Алексеевич Чумаков, ассистент кафедры нефтегазовых техники и технологий Южно-Российского государственного политехнического университета (НПИ) имени М.И. Платова, Россия, 346400, г. Новочеркасск, ул. Просвещения, 132; a-chumakow@mail.ru

Кирилл Владимирович Кривошеев, студент кафедры нефтегазовых техники и технологий Южно-Российского государственного политехнического университета (НПИ) имени М.И. Платова, Россия, 346400, г. Новочеркасск, ул. Просвещения, 132; 210506.tbn@mail.ru

Поступила в редакцию: 01.07.2024

Поступила после рецензирования: 04.07.2024

Принята к публикации: 09.07.2024

REFERENCES

1. Tulubaev A.B., Koroleva I.A., Kazantseva A.M., Popova Zh.S. Solutions for low-temperature drilling conditions. *Exposition Oil Gas*, 2021, no. 6 (85), pp. 68–71. (In Russ.) DOI: 10.24412/2076-6785-2021-6-68-71.
2. Rushkov D.R., Zlobin I.I., Zakirov N.N. Temperature influence of drilling fluids on permafrost. *Bulatov readings*. Krasnodar, 2022. Vol. 1, pp. 444–445. (In Russ.)
3. Ivanov I.S. Research and development of drilling fluid formulations to reduce the rate of thawing of permafrost during well construction. *Oil shift. Energy of the future! Materials of the VIII All-Russian Scientific and Practical Conference*. Krasnoyarsk, Siberian Federal University Publ., 2022. pp. 149–150. (In Russ.)
4. Zavorotny V.L., Starodubtseva K.A., Zaporozhskaya A.A., Zaporozhsky K.I., Dunvev S.A., Sidorov D.N., Baleevskikh A.V. Development and study of low-toxic base fluids of invert-emulsion drilling fluids for offshore drilling. *Oil. Gas. Innovations*, 2022, no. 4 (257), pp. 22–28. (In Russ.)
5. Tretyak A.Ya., Krivosheev K.V., Poltorak M.N. Chemical reagents for water-based drilling fluids under low-temperature well drilling conditions. *Current problems of subsoil use-2023: Materials of the International Scientific and Practical Conference*.

- Novocherkassk, October 27, 2023. Novocherkassk, South Russian State Polytechnic University (NPI) named after M.I. Platova Publ., 2024. pp. 208–214. (In Russ.)
6. Dmitriev A.N., Budovskaya M.E., Milvit I.V., Leoshko N.I. Normalization of the temperature regime of wells when drilling through permafrost rocks with bottom hole cleaning with air. *Drilling and oil*, 2023, no. S2, pp. 54–57. (In Russ.)
 7. Rushkov D.R., Zakirov N.N. Difficulties that arise when drilling in permafrost. *Bulatov readings*. Krasnodar, 2022. Vol. 1, pp. 442–443. (In Russ.)
 8. Perelygin K.O. Thawing of permafrost rocks when drilling oil and gas wells. *Models of innovative solutions for increasing the competitiveness of domestic science. Collection of articles of the All-Russian scientific and practical conference with international participation*. Ufa, April 13, 2023. Ufa, Limited Liability Company “Aeterna” Publ., 2023. pp. 22–23. (In Russ.)
 9. Tulubaev A.B. Development and research of drilling fluid components for low-temperature drilling conditions. *Technological solutions for the construction of wells in fields with complex geological and technological conditions for their development. Materials of the II international scientific and practical conference dedicated to the memory of Viktor Efimovich Kopylov*. Tyumen, February 15–17, 2022. pp. 292–296. (In Russ.)
 10. Kondrenko O.S. Drilling fluids for opening up layers in permafrost conditions. *Construction of oil and gas wells on land and at sea*, 2009, no. 10, pp. 22–24. (In Russ.)
 11. Gasumov R.A., Kondrenko O.S., Gasumov E.R. The main dominant factors of thermal impact on frozen rocks when drilling wells in cryolithozones. *Bulletin of the North Caucasus State Technical University*, 2010, no. 2, pp. 5–12. (In Russ.)
 12. Polozkov K.A., Basniev K.S., Gaftunyak P.I. Complications arising during the construction and operation of wells in permafrost zones, and measures to prevent them. *Construction of oil and gas wells on land and at sea*, 2010, no. 1, pp. 6–10. (In Russ.)
 13. Minakov A.V., Pryazhnikov M.I., Neverov A.L., Guzei D.V., Lobasov A.S., Zhigarev V.A. Testing a mathematical model of thermohydraulic processes during drilling the wells under the permafrost conditions. *Interfacial Phenomena and Heat Transfer*, 2020, vol. 8, no. 3, pp. 235–247. DOI: 10.1615/InterfacPhenomHeatTransfer.2020035213.
 14. Petrova L.V., Petrov A.N. The technology of opening and mining sites of complex occurrence of placer deposits in permafrost conditions. *IOP Conference Series: Earth and Environmental Science: International Science and Technology Conference “EarthScience”*. Russian Island, December 10–12, 2019. Vol. 459, no. 4, Ch. 3. Russian Island, Institute of Physics Publ., 2020. # 042094. DOI: 10.1088/1755-1315/459/4/042094.
 15. Liu N., Xu H., Yang Y., Wang L., Talalay P., Han L. Physicochemical properties of potential low-temperature drilling fluids for deep ice core drilling. *Cold Regions Science and Technology*, 2016, vol. 129, pp. 45–50. DOI: 10.1016/j.coldregions.2016.06.004.
 16. Vaganova N.A. Simulation of thermal stabilization of bases under engineering structures in permafrost zone. *AIP Conference Proceedings: proceedings of the 44th International conference on applications of mathematics in engineering and economics: (AMEE'18)*. Sozopol, Bulgaria, 08–12 June 2018. Vol. 2048. Sozopol, Bulgaria, AIP Publ., 2018. # 030010. DOI: 10.1063/1.5082068.
 17. Wei Z., Jin H.J., Zhang J.M., Yu S.P., He R.X., Chang X.L., Han X.J., Ji Y.J. Prediction of permafrost changes in Northeastern China under a changing climate. *Science China Earth Sciences*, 2011, vol. 54, no. 6, pp. 924–935. DOI: 10.1007/s11430-010-4109-6.
 18. Zhang Z.Q., Wu Q.B. Thermal hazards prediction on Qinghai-Tibet Plateau permafrost region. *Jilin Daxue Xuebao (Diqu Kexue Ban)*, 2012, vol. 42, no. 2, pp. 454–461.
 19. Pryazhnikov M.I., Mikhienkova E.I., Neverov A.L., Mateev A.V., Zhigarev A.V., Guzei D.V. Numerical research of heat transfer processes at the drilling wells in permafrost rocks. *Journal of Physics: Conference Series. XXXV Siberian Thermophysical Seminar*. Novosibirsk, 27–29 August 2019. Vol. 1382, Novosibirsk, Institute of Physics Publ. 2019. # 012091. DOI: 10.1088/1742-6596/1382/1/012091.
 20. Kamel A.H. A novel mud formulation for drilling operations in the permafrost. *Society of Petroleum Engineers – SPE Western Regional. Pacific Section AAPG Joint Technical Conference 2013: Energy and the Environment Working Together for the Future*. Monterey, CA, 19–25 April 2013. pp. 252–261.

Information about the authors

Alexander Ya. Tretyak, Dr Sc., Professor, Head of the Oil and Gas Techniques and Technologies Department, South-Russian State Polytechnic University (NPI) named after M.I. Platov, 132, Prosvesvcheniya street, Novocherkassk, 346400, Russian Federation; 13050465@mail.ru; <https://orcid.org/0000-0001-7362-5536>

Andrey A. Chumakov, Assistant, South-Russian State Polytechnic University (NPI) named after M.I. Platov, 132, Prosvesvcheniya street, Novocherkassk, 346400, Russian Federation; a-chumakow@mail.ru

Kirill V. Krivosheev, Student, South-Russian State Polytechnic University (NPI) named after M.I. Platov, 132, Prosvesvcheniya street, Novocherkassk, 346400, Russian Federation; 210506.tbn@mail.ru

Received: 01.07.2024

Revised: 04.07.2024

Accepted: 09.07.2024

УДК 574.4; 581.5
DOI: 10.18799/24131830/2024/9/4448
Шифр специальности ВАК: 1.6.4

Оценка особенностей аэрогенного воздействия Норильского промышленного комплекса на природную среду с использованием эпигейных лишайников

А.В. Горбунов¹, Д.Б. Петренко^{1,2✉}, Б.В. Ермолаев¹,
А.А. Дронова^{1,2}, Е.В. Аристархова^{1,2}, О.И. Окина¹

¹ Геологический институт РАН, Россия, г. Москва

² Государственный университет просвещения, Россия, г. Мытищи

✉ dbpetrenko@yandex.by

Аннотация. *Актуальность* исследования обусловлена необходимостью изучения особенностей аэрогенного воздействия Норильского промышленного комплекса на природную среду. *Цель:* изучение особенностей аэрогенного воздействия Норильского промышленного комплекса в южной-юго-западной зоне на удалении 40–60 км с использованием лишайников *Cladonia rungeferina* и *Cetraria sp.* *Объекты:* почва, лишайники *Cladonia rungeferina* и *Cetraria sp.* *Методы.* Проведен отбор образцов почв и лишайников в 40–60 км к югу-юго-западу от Норильского промышленного района. Отбор образцов проводился по схеме двух профилей протяженностью 14 и 20 км. Анализ образцов проводился с помощью комплекса методов, состоящего из рентгено-флуоресцентного («S4 Pioneer» Bruker AXS), атомно-абсорбционного методов (КВАНТ-2А, Юлия-5К) и масс спектрометрии с индукционно-связанной плазмой (ELEMENT-2) в лаборатории ГИН РАН, г. Москва. Определялась концентрация Ti, V, Ni, Cr, Mn, Fe, Co, Cu, Zn, As, Se, Rb, Cd, Sb, Ba, La, Ce, Hg, Pb, Th, U. *Результаты.* Получены данные о концентрации 21-го элемента в почвах и лишайниках. Рассчитано и показано распределение элементов в почве и лишайниках относительно концентрации в верхней части континентальной коры. Рассчитан коэффициент обогащения EF (enrichment factor) для Mn, Ni, Cu, Hg, Pb, оценено распределение этого коэффициента для обоих профилей. Показано, что техногенная составляющая аэрогенного воздействия для Mn, Ni, Cu, Pb к югу-юго-западу от Норильского промышленного комплекса на расстоянии 40–60 км практически отсутствует. Повышенные значения коэффициента обогащения EF (enrichment factor) в лишайниках для Hg объясняются сочетанием двух факторов – постоянного присутствия ртути в значительных концентрациях в экосистемах и тундровых пожаров, прошедших в этой зоне в 2019–2020 гг., что и привело в конечном итоге к повторному осаждению Hg на выгоревших территориях.

Ключевые слова: Норильский производственный комплекс, аэрогенное воздействие, Mn, Ni, Cu, Hg, Pb, почва, лишайник

Для цитирования: Оценка особенностей аэрогенного воздействия норильского промышленного комплекса на природную среду с использованием эпигейных лишайников / А.В. Горбунов, Д.Б. Петренко, Б.В. Ермолаев, А.А. Дронова, Е.В. Аристархова, О.И. Окина // Известия Томского политехнического университета. Инжиниринг георесурсов. – 2024. – Т. 335. – № 9. – С. 31–39. DOI: 10.18799/24131830/2024/9/4448

UDC 574.4; 581.5
DOI: 10.18799/24131830/2024/9/4448

Assessment of the aerogenic impact of the Norilsk industrial complex on the natural environment using epigeal lichens

A.V. Gorbunov¹, D.B. Petrenko^{1,2✉}, B.V. Ermolaev¹, A.A. Dronova^{1,2},
E.V. Aristarkhova^{1,2}, O.I. Okina¹

¹ Geological Institute RAS, Moscow, Russian Federation

² State University of Education, Mytishchi, Russian Federation

✉ dbpetrenko@yandex.by

Abstract. Relevance. The need to study the features of aerogenic effects of the Norilsk industrial complex on the natural environment. **Aim.** To study the features of the aerogenic effects of the Norilsk industrial complex in the south-southwest zone at a distance of 40–60 km using lichens *Cladonia rungeferina* and *Cetraria* sp. **Objects.** Soil, lichens *Cladonia rungeferina* and *Cetraria* sp. **Methods.** Soil and lichen samples were taken 40–60 km south-southwest of the Norilsk Industrial district. Sampling was carried out according to the scheme of two profiles with a length of 14 and 20 km. The samples were analyzed using a set of methods consisting of X-ray fluorescence (S4 Pioneer Bruker AXS), atomic absorption methods (KVANT-2A, Julia-5K) and induction-coupled plasma mass spectrometry (ELEMENT-2) in the laboratory of the GIN RAS, Moscow. The concentration of Ti, V, Ni, Cr, Mn, Fe, Co, Cu, Zn, As, Se, Rb, Cd, Sb, Ba, La was determined. **Results.** The authors have obtained the data on the concentration of the 21 elements in soils and lichens. The paper demonstrates the calculation of distribution of elements in soil and lichens relative to the concentration in the upper part of the continental crust. The authors calculated the enrichment factor for Mn, Ni, Cu, Hg, Pb and estimated the distribution of this coefficient for both profiles. It is shown that the technogenic component of the aerogenic effect for Mn, Ni, Cu, Pb to the south-southwest of the Norilsk industrial complex at a distance of 40–60 km is practically absent. The increased values of the enrichment factor in lichens for Hg are explained by a combination of two factors – the constant presence of mercury in significant concentrations in ecosystems and tundra fires that took place in this zone in 2019–2020, which ultimately led to the re-deposition of Hg in the burnt areas.

Keywords: Norilsk industrial complex, aerogenic impact, Mn, Ni, Cu, Hg, Pb, soil, lichen

For citation: Gorbunov A.V., Petrenko D.B., Ermolaev B.V., Dronova A.A., Aristarkhova E.V., Okina O.I. Assessment of the aerogenic impact of the Norilsk industrial complex on the natural environment using epigeal lichens. *Bulletin of the Tomsk Polytechnic University. Geo Assets Engineering*, 2024, vol. 335, no. 9, pp. 31–39. DOI: 10.18799/24131830/2024/9/4448

Введение

В центральной части Арктического региона воздействие на природную среду формируется в основном за счет Норильского горно-металлургического комплекса. Норильский промышленный район (НПР) представляет собой единый производственный комплекс по добыче и производству цветных и драгоценных металлов. В данном промышленном районе ведётся добыча Cu,

Ni, Co, Pd, Os, Pt, Au, Ag, Ir, Rh, Ru. Попутная продукция: техническая сера, Se, Te, H₂SO₄. Столь широкий ряд продукции обуславливает и разнообразие вредных выбросов с предприятий НПР: на эти предприятия приходится 78 % вредных выбросов Красноярского края и 10 % Российской Федерации [1–4]. Наиболее активными поллютантами являются диоксид серы и тяжелые металлы: Cu, Ni, Pb.

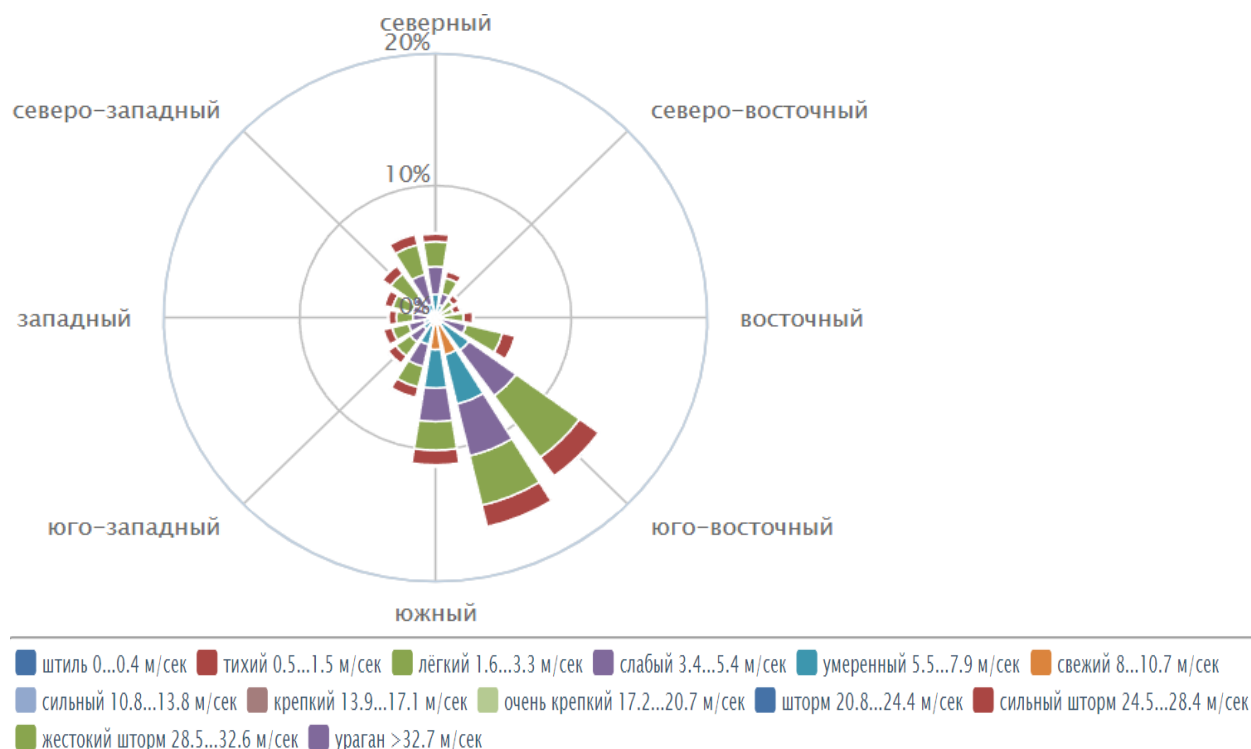


Рис. 1. Роза ветров, Норильский промышленный район, 2021 г.

Fig. 1. Wind rose, Norilsk industrial district, 2021

Согласно розе ветров (рис. 1) в районе Норильского промышленного комплекса в течение 2021 г. преобладали юго-юго-восточные ветра со скоростью 0,5–7,9 м/сек-в общем около 42 % [5]. В зависимости от сезона направление ветров кардинально меняется: например, в январе преобладают северо-северо-западные ветра (около 50 %). Исследования, проведенные в этом регионе в юго-восточном направлении [1, 2] позволили выявить три зоны аэрогенного воздействия Норильского промышленного комплекса на природную среду. Первая зона распространена до 80 км от промышленного центра, вторая зона – 80–140 км, третья зона – на удалении более 140 км. В первой зоне древесная растительность погибла полностью. Содержание серы в растениях превышает фоновый уровень, (в качестве которого был взят участок вблизи р. Черной в 223 км от Норильска) в 1,2–4 раза, никеля – в 1,5–470 раз, меди – в 1,3–156 раз [6]. В зоне 80–140 км появляются черты, свойственные данной биоклиматической зоне, подлесок и мохово-травянистая растительность не угнетены. В этой зоне содержание серы, никеля и меди в растениях близки к фоновым значениям.

Данные о распространении аэрогенного воздействия Норильского промышленного района в направлении юг, юго-запад практически отсутствуют.

При оценке техногенных факторов воздействия на природную среду наиболее важным является контроль за атмосферными выпадениями. Этот контроль может осуществляться несколькими методами: отбор атмосферных аэрозолей с помощью аспираторов, расположение планшетов на исследуемых территориях, отбор образцов снежного по-

крова, оценка с помощью мхов и лишайников. В результате анализа достоинств и недостатков каждого из этих методов мы остановились на использовании последнего метода. В отличие от воды и атмосферного воздуха, которые выступают в роли транспортирующих сред, лишайники являются депонирующей средой и наиболее объективными индикаторами техногенного загрязнения экосистем [7, 8]. При изучении аэрогенного воздействия использовались многие виды лишайников, но наиболее перспективными из них считаются *Cladonia rungeferina* и *Cetraria sp.* [7–9]. С точки зрения распространенности, доступности и легкости пробоотбора эти лишайники представляют собой универсальные объекты для исследования.

Целью настоящей работы было изучение особенностей аэрогенного воздействия на природную среду к югу и юго-западу от Норильского промышленного комплекса с использованием эпигейных (растущих на почве) лишайников *Cladonia rungeferina* и *Cetraria sp.*

Методика эксперимента

Отбор образцов. Отбор образцов проводился в летний сезон 2021 г. в Таймырском Долгано-Ненецком районе в 40–60 км к юго-юго-западу от Норильского промышленного комплекса.

Площадки отбора образцов характеризовались бедным распространением растительности, видимо, вследствие низовых пожаров, произошедших в этой области в 2019–2020 гг. (рис. 2). Растительность представлена многолетними морозоустойчивыми травами: осокой, господствующей в низинах и болотах, лютиком, пушицей, лишайниками.



Рис. 2. Ландшафт места отбора проб (фото Д.Б. Петренко)
Fig. 2. Landscape of the sampling site (photo by D.B. Petrenko)

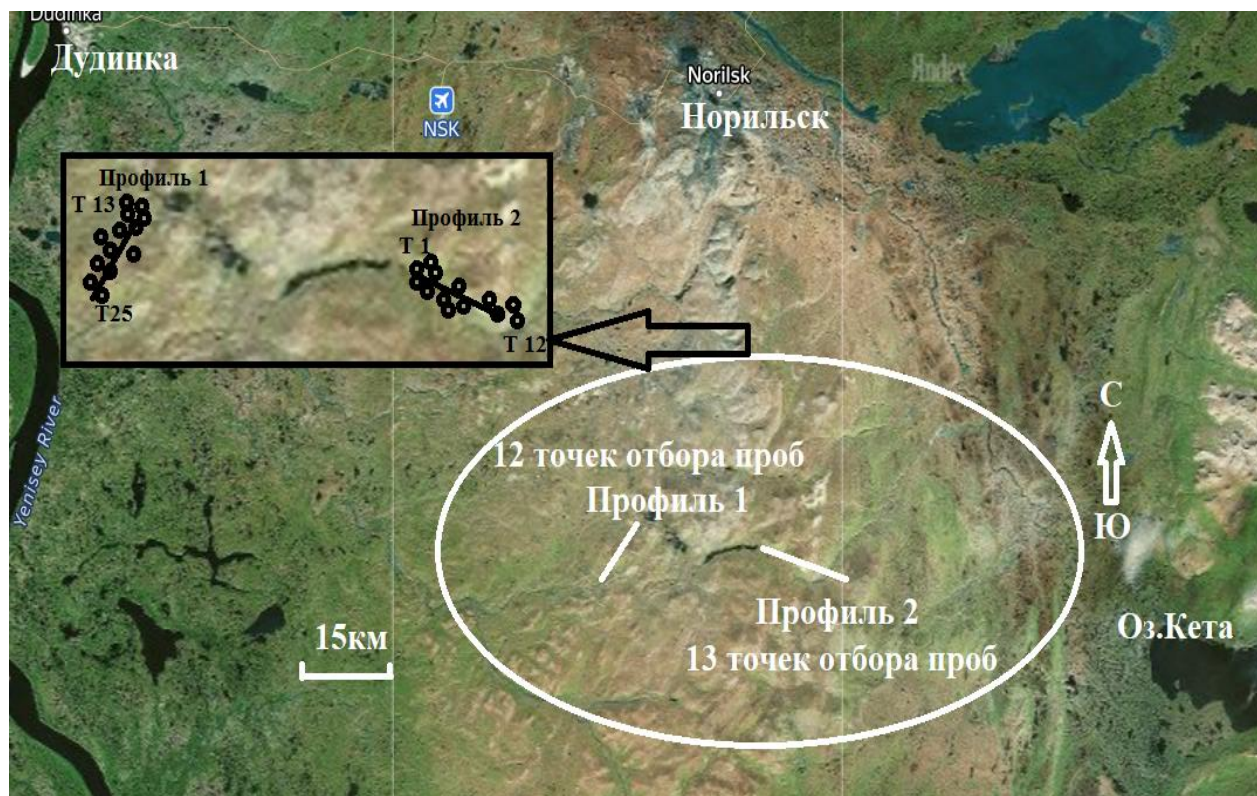


Рис. 3. Схема отбора проб
Fig. 3. Sampling scheme

Лишайники были представлены видами *Cetraria islandica*, *Cladonia rangiferina*, *Cladonia alpestris*. Следует отметить, что лишайники сохранились в основном в низинах и за буграми с подветренной стороны. Среди кустарничков наблюдались голубика, морошка, черника, брусника. Пожары относительно редки в экосистемах субарктической лесотундры, но они могут сильно изменить свойства экосистем – на исследуемой территории полностью выгорела древесная растительность (карликовая береза, полярная ива).

Образцы почвы и лишайников [видов *Cladonia rangiferina* ((L.) Weber ex F.H.Wigg) и *Cetraria sp.*] отбирались с одних и тех же площадок, отбор образцов осуществлялся условно по схеме двух профилей: профиль 1 – СВ-ЮЗ протяженностью 20 км, и профиль 2 – СЗ-ЮВ протяженностью 14 км с шагом около 0,5–2 км (в зависимости от наличия или отсутствия необходимых лишайников шаг изменялся в широких пределах) (рис. 3). В каждой точке отбиралась почва и лишайник, всего было отобрано 25 проб почвы и 25 проб лишайников. Почва глеево-подзолистая, торфяно-глеевая, бурая супесчаная или суглинистая. В верхнем горизонте почвы (1–3 см) наблюдалось преобладание продуктов горения – крупно- и тонкодисперсная зола, обугленные древесные останки, подстилка в значительной степени минерализована. Почва отбиралась в соот-

ветствии с существующими нормативами ГОСТ Р 58595-2019 [10]. Отбор проб лишайников проводился в соответствии с опубликованными в литературных источниках рекомендациями [7–9, 11] в стерильные полиэтиленовые пакеты zip-лок, усредненные пробы лишайников отбирали с площади 10–20 м². Для анализа отбирали верхние части (3–7 см) талломов лишайников.

Анализ образцов. Отобранные образцы лишайников высушивали при комнатной температуре, а затем в сушильном шкафу при температуре 30 °С доводили до постоянного веса. Образцы, подготовленные таким образом, измельчали в гомогенизаторе до размеров <1 мм. Для анализа от каждого образца отбирали три параллельные навески по 150–500 мг. Пробы почвы высушивали при температуре 30 °С до воздушно-сухого состояния, просеивали через сито с диаметром отверстий 1 мм и истирали до крупности зерна 60–80 мкм (сито 200 меш). Анализ образцов почвы проводился при помощи рентгенофлуоресцентного (РФА) метода с использованием последовательного волнового XRF спектрометра «S4 Pioneer» (Bruker AXS, Германия). Обработка полученных результатов осуществлялась программой «S4 Spectra Plus». Образцы лишайника анализировали с помощью масс спектрометра с индуктивно-связанной плазмой высокого разрешения «ELEMENT-2» (Thermo Fisher Scien-

tific, США). Совместное использование этих методов обеспечивает определение в отобранных образцах большинства интересующих нас элементов в широком диапазоне концентраций, за исключением определения Hg в почвах и лишайниках, а также Fe и Zn в лишайниках. Концентрация Hg в отобранных образцах определялась с помощью анализатора ртути «Юлия-5К» (НПО «Метрология», Россия), концентрация Fe и Zn в лишайниках определялась с помощью пламенной атомно-абсорбционной спектрометрии на анализаторе «КВАНТ-2А» (КОРТЭК, Россия). В отобранных образцах была оценена концентрация Ti, V, Cr, Mn, Fe, Co, Cu, Zn, As, Se, Rb, Cd, Sb, Ba, La, Ce, Hg, Pb, Th, U. Все аналитические работы проводились в соответствии с аттестованными методиками, утвержденными в качестве руководящих документов, с использованием стандартных образцов состава производства МАГАТЭ, Китай, Россия. Анализ состава отобранных образцов осуществлялся в Лаборатории химико-аналитических исследований Геологического института РАН.

Результаты

В табл. 1 приведены данные о концентрации тяжелых и токсичных элементов в образцах почвы и лишайников. Следует отметить, что концентрация токсичных элементов в почве находится в пределах значений ПДК и ОДК, величина стандартного отклонения практически для всех приведенных в таблице элементов находится в пределах 30–35 %, что говорит о достаточно равномерной выборке данных, $r_{H_{KCl}}=4,35-5,11$ [12]. Значения концентрации элементов, приведенные для лишайников, на порядок меньше, чем в почвах.

Исключение составляет концентрация Hg, которая сопоставима по величине с концентрацией в почве. Данные, приведенные в таблице для почвы и лишайников, обладают чрезвычайно высокой вариабельностью, что говорит о значительной неравномерности в выборке. Для того чтобы оценить особенности распределения элементов в лишайниках относительно почвы, было рассчитано отношение концентрации элементов в почве и лишайнике на концентрацию элементов в верхней части континентальной коры [9, 13–15] по формуле:

$$K_{отн} = C_i(\text{почва, лишайник})/C_{i\text{з.к.}}$$

где C_i – концентрация i -го элемента в почве или лишайнике; $C_{i\text{з.к.}}$ – концентрация i -го элемента в верхней части земной коры.

Распределение полученного коэффициента $K_{отн}$ в почве и лишайнике приведено на рис. 3, графики расположены по мере убывания $K_{отн}$ в почве. В наибольшей степени в почве накапливаются такие элементы, как Cu, Cr, Ni, Co, ($K_{отн}=1,6-2,4$).

В лишайниках следует отметить накопление Cu, Ni, Hg, Mn, Cd и Pb, которые можно отнести к аэрогенному воздействию.

Таблица 1. Элементный состав почвы и лишайников, воздушно-сухой вес, мг/кг

Table 1. Elemental composition of soil and lichens, air-dry weight, mg/kg

Элемент Element	Почва/Soil		Лишайник/Lichen	
	$C_{\text{ср}} \backslash C_{\text{мед}}$ $C_{\text{mean}} \backslash C_{\text{median}}$	$C_{\text{мин}} - C_{\text{макс}}$ $C_{\text{min}} - C_{\text{max}}$	$C_{\text{ср}} \backslash C_{\text{мед}}$ $C_{\text{mean}} \backslash C_{\text{median}}$	$C_{\text{мин}} - C_{\text{макс}}$ $C_{\text{min}} - C_{\text{max}}$
Ti	5260\5675	2213–8745	49,8\34,3	16,5–331
V	173\184	94–270	1,9\0,93	0,63–11,9
Cr	194\185	105–471	3,55\2,68	0,96–16,2
Mn	968\957	383–1987	51\30,8	5,15–162
Fe	42810\43115	12268–87568	407\515	218–933
Co	27,2\25,2	10,3–52,1	1,31\1,09	0,62–3,57
Ni	93,5\82,5	49,4–287	24,2\19,2	9,47–19,2
Cu	93,6\82,8	34,6–228	18,5\13,9	6,02–74,2
Zn	95,4\96,1	54,5–155	16,1\16,6	5,83–27,5
As	6,6\6,52	5,51–819	0,18\0,16	0,11–0,82
Se	4,7\4,51	2,25–8,36	0,95\0,76	0,26–3,28
Sr	119\118	62,6–219	6,28\3,04	1,04–29,6
Cd	0,73\0,67	0,43–1,18	0,14\0,12	0,05–0,59
Sn	0,61\0,66	0,31–1,03	0,16\0,12	0,05–0,55
Sb	0,04\0,06	0,02–0,07	0,02\0,02	0,01–0,11
Ba	488\494	154–956	6,76\5,02	1,47–18,3
La	11,9\12,5	7,91–15,8	0,51\0,43	0,22–0,86
Ce	26,9\27,3	18,8–35,3	1,11\0,92	0,56–1,75
Hg	0,095\0,91	0,052–0,133	0,032\0,021	0,009–0,089
Pb	14,8\14,1	11,6–20,7	2,39\1,91	0,25–6,72
Th	2,97\3,32	2,21–6,72	0,053\0,065	0,028–0,099
U	1,03\1,22	2,23–1,56	0,014\0,013	0,01–0,022

Обсуждение

Учитывая специфику производства, основными маркерами воздействия Норильского промышленного комплекса на природную среду являются Ni, Cu и Pb. Графики, представленные на рис. 3, позволяют отнести к основным поллютантам также Mn и Hg. Для того чтобы оценить соотношение техногенных и терригенных источников поступления Mn, Ni, Cu, Pb и Hg в талломы лишайников, нами были рассчитаны значения коэффициента обогащения EF (enrichment factor) для этих элементов по точкам отбора на профилях 1 и 2. Коэффициент EF широко используется в анализе атмосферных аэрозолей и лихенометрических исследованиях [11, 16–18]. Величина этого коэффициента показывает соотношение элементов-загрязнителей и основных литогенных элементов (Fe, Si, Al) в атмосферных выпадениях, вычлняя техногенную составляющую. В качестве эталонной величины нами использовалось содержание Fe в верхней части земной коры [9, 13, 14].

Расчёт коэффициента проводился по формуле:

$$EF = \frac{C_i / C_{\text{Fei}}(\text{лишайник})}{C_{i\text{з.к.}} / C_{\text{Fe з.к.}}(\text{земная кора})}$$

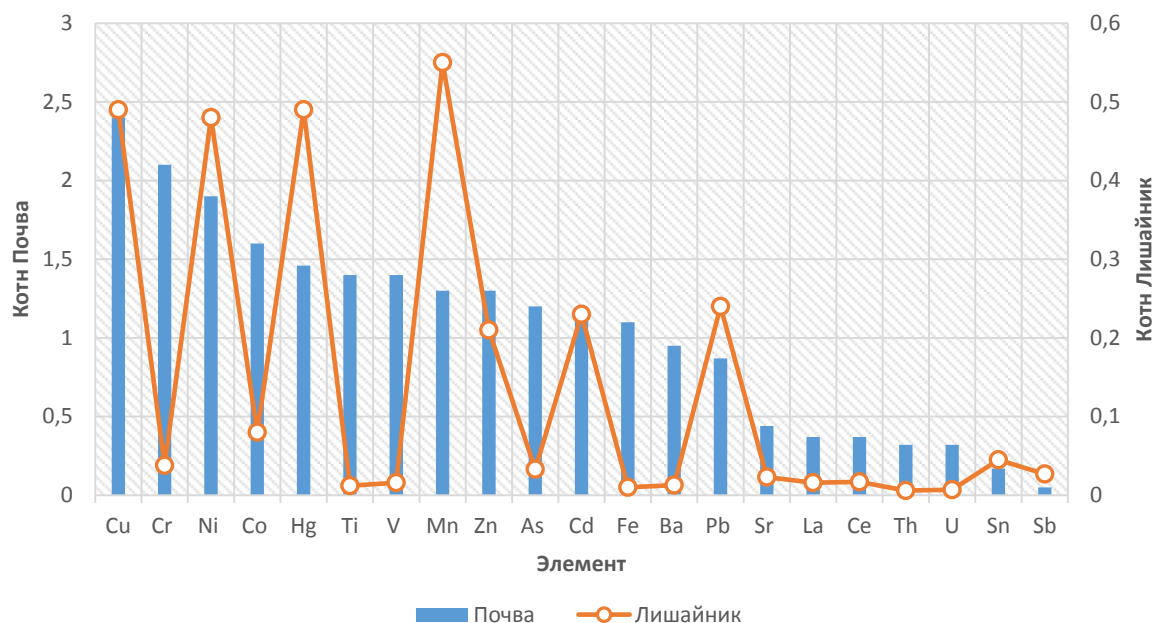


Рис. 4. Распределение элементов в почве и лишайниках относительно концентрации в верхней части континентальной коры

Fig. 4. Distribution of elements in soil and lichens relative to concentrations in the upper part of the continental crust

где C_i – концентрация изучаемого элемента в лишайнике; C_{Fei} – концентрация Fe в лишайнике; $C_{Fe_{з.к}}$ – концентрация Fe в земной коре; $C_{i_{з.к}}$ – концентрация изучаемого элемента в земной коре.

Источники поступления элементов классифицируются на три группы в зависимости от рассчитанной величины EF. Низкие значения коэффициента обогащения ($E_F < 10$) указывают на отсутствие антропогенных источников. В этом случае основным источником изучаемого элемента является местная минеральная и органическая пыль. Элементы с коэффициентами обогащения в интервале от 10 до 100 считаются умеренно обогащенными (до 50 %) и имеют смешанное происхождение. Значение коэффициента $E_F > 100$ характеризует существенный вклад антропогенного источника (выше 50 %) [11, 16–18]. В табл. 2 представлены среднеарифметические значения коэффициента EF, рассчитанного по точкам отбора образцов профилей 1 и 2.

Таблица 2. Среднее значение коэффициента EF по профилям 1 и 2

Table 2. Average value of EF coefficient for profiles 1 and 2

Элемент Element	Профиль 1 Selection profile 1		Профиль 2 Selection profile 2	
	EF	мин/макс min/max	EF	мин/макс min/max
Mn	1,6	0,65/3,6	1,7	0,71/5,3
Ni	2,22	0,24/4,56	1,78	0,22/6,93
Cu	2,31	0,15/7,07	1,65	0,17/6,15
Hg	18	2,7/62,6	23,1	2,54/74
Pb	1,6	0,65/3,6	4,52	1,23/14,5

Согласно данным табл. 2, величина коэффициента EF для Mn, Ni и Cu находится в диапазоне 0,15–6,9, что указывает на отсутствие техногенного воздействия на лишайники на протяжении обоих профилей. Диапазон значений величины коэффициента EF для Pb находится в пределах 0,6–4,5, для точек 6 и 7 профиля 2 он увеличивается до 14–15. Практически это также указывает на отсутствие какого-либо техногенного воздействия Pb. Для профилей 1 и 2 коэффициент EF Hg составляет в среднем 18 и 23,1, соответственно, максимальные величины достигают значений 63 и 74. Это указывает на значительное возрастание техногенного воздействия Hg на воздушную среду. Появление Hg в качестве приоритетного техногенного загрязнителя природной среды в данном регионе было несколько неожиданным: руды НПР в основном представлены пирротинном, халькопиритом, пентландитом, пиритом и кубанитом [19, 20]. В этих минералах Hg представлена примесями с концентрациями 0,7–6,2 г/т, что не предполагает значительного присутствия Hg в производственных выбросах НПР. По мнению авторов наиболее вероятной причиной этого являются два обстоятельства:

1. Примерно половина выбросов Hg в окружающую среду имеет природное происхождение и является следствием дегазации земной коры. По этой причине Hg постоянно присутствует в любой экосистеме в значительных количествах [21].
2. Второй причиной послужили тундровые пожары 2019–2020 гг. Пожары имели характер

так называемого «низового» пожара, температура составляла около 400–450 °С. По литературным данным в верхнем горизонте почвы и золе растений после пожара концентрация Hg уменьшается примерно на порядок. При этом Hg переходит в атомарное состояние и распространяется в виде газовой компоненты атмосферы [22–24], концентрация Hg в атмосфере резко (в 7–10 раз) увеличивается. В дальнейшем происходит сорбция Hg атмосферными аэрозолями с последующим осаждением на поверхности выгоревших площадей, в том числе и на сохранившиеся лишайники. Это ведет к увеличению общей концентрации Hg в лишайнике и, соответственно, к увеличению EF. Следует подчеркнуть, что это увеличение происходит именно за счет совпадения есте-

ственных природных факторов и не является следствием техногенного воздействия.

Заключение

Аэрогенное воздействие Норильского промышленного комплекса в исследуемом районе не обнаружено. Выявлена атмосфернохимическая аномалия Hg умеренной интенсивности ($EF=10-100$). Эта аномалия, по мнению авторов, не имеет отношения к Норильскому промышленному району, и возникла она при сочетании двух факторов – постоянного присутствия ртути в значительных концентрациях в экосистемах за счет природных факторов и тундровых пожаров 2019–2020 гг., которые привели в конечном итоге к вторичному осаждению Hg на выгоревших территориях.

СПИСОК ЛИТЕРАТУРЫ

1. Техногенное воздействие на окружающую среду в Российской Арктике на примере Норильского промышленного района / Н.В. Юркевич, И.Н. Ельцов, В.Н. Гуреев, Н.А. Мазов, Н.В. Юркевич, А.В. Еделев // Известия Томского политехнического университета. Инжиниринг георесурсов. – 2021. – Т. 332. – № 12. – С. 230–249.
2. Соколов Ю.И. Арктика: к проблеме накопленного экологического ущерба // Арктика: Экология и экономика. 2013. – № 2. – С. 18–27.
3. Assessment of the state of soil microbial cenoses in the forest-tundra zone under conditions of airborne industrial pollution / A.V. Bogorodskaya, T.V. Ponomareva, O.A. Shapchenkova, A.S. Shishikin. // Eurasian Soil Science. – 2012. – Vol. 45. – № 5. – P. 521–531. DOI: 10.1134/S106422931205002X.
4. Резникова Е. Беллона «Норникель»: экологические амбиции. – 2019. – 31 с. URL: <https://bellona.ru/publication/nornikel-ekologicheskie-ambitsii/> (дата обращения 01.10.23).
5. Gismeteo: Погода в России. URL: <https://www.gismeteo.ru> (дата обращения 01.10.2023).
6. Зубарева О.Н. Оценка дальности распространения выбросов в зоне влияния группы предприятий «Норильский никель» на основе анализа растений // Эволюция биосферы и техногенез: Материалы Всерос. конф. – Чита, 22–28 августа 2016. – Чита: Бурятский научный центр СО РАН, 2016 – С. 202–204.
7. Большунова В.С., Рихванов Л.П., Барановская Н.В. Элементный состав лишайников как индикатор загрязнения атмосферы // Экология и промышленность России. – 2014. – № 11. – С. 26–31.
8. Towards understanding the effect of heavy metals on mycobion physiological condition in a widespread metal-tolerant lichen *Cladonia rei*. ELSEVIER / K. Rola, E. Latkowska, W. Ogar, P. Osyczka // Chemosphere. – 2022. – Vol. 308. – P. 1–9. DOI: 10.1016/j.chemosphere.2022.136365.
9. Nash T. H., Gries C. The use of lichens in atmospheric deposition studies with an emphasis on the arctic // Science of the total environment. – 1995. – Vol. 160–161. – P. 729–736. DOI: 10.1016/0048-9697(95)04406-Q.
10. ГОСТ Р 58595-2019. Почвы. Отбор проб. – М.: Стандартинформ, 2019. – 5 с.
11. Nash T.H. Nutrients, elemental accumulation, and mineral cycling // Lichen Biology. – 2008. – P. 234–251. DOI: 10.1017/CBO9780511790478.013.
12. СанПиН 1.2.3685-21. Гигиенические нормативы и требования к обеспечению безопасности и (или) безвредности для человека факторов среды обитания. – М.: ГАРАНТ, 2021. – 972 с.
13. Григорьев Н.А. Распределение химических элементов в верхней части континентальной коры. – Екатеринбург: Уральское отделение РАН, 2009. – 383 с.
14. Касимов Н.С., Власов Д.В. Кларки химических элементов как эталоны сравнения в экогеохимии // Вест. Московского Университета сер. 5, география. – 2015. – № 2. – С. 7–18.
15. Rudnick R.L., Gao S. Composition of the continental crust // Treatise on Geochemistry. Elsevier. – 2014. – Vol. 3. – P. 1–51. DOI: 10.1016/B978-0-08-095975-7. 00301-6.
16. Bačkor M., Loppi S. Interactions of lichens with heavy metals // Biologia Plantarum. – 2009. – Vol. 53. – № 2. – P. 214–222. DOI: 10.1007/s10535-009-0042-y.
17. Первые данные о распределении изотопов, макро-и микроэлементов из атмосферных выпадений в лишайниках арктических территорий Западной Сибири / М.Ю. Кропачева, К.А. Мезина, Д.К. Белянин, М.С. Мельгунов, И.В. Макарова // Известия Томского политехнического университета. Инжиниринг георесурсов, – 2022. – Т. 333. – № 9. – С. 46–56.
18. Assessment of major ions and trace elements in snow: a case study across northeastern China, 2017–2018 / H. Xue, W. Chen, M. Li, B. Liu, G. Li, X. Han // Chemosphere. – 2020. – Vol. 251. – P. 126328. DOI: 10.1016/j.chemosphere.2020.126328.
19. Trace elements composition of surface snow in the polar zone of northwestern Siberia: the impact of urban and industrial emissions / R. Pozhitkov, D. Moskovchenko, A. Soromotin, A. Kudryavtsev, E. Tomilova // Environmental Monitoring and Assessment. – 2020. – Vol. 192. – № 4. – P. 215. DOI: 10.1007/s10661-020-8179-4.

20. Додин Д.А., Чернышов Н.М., Череднакова О.И. Металлогения платиноидов крупных регионов России. – М.: Геоинформмарк, 2001. – 302 с.
21. Пурмаль А.П. Антропогенная токсикация планеты // Соросовский образовательный журнал. – 1998. – № 9. – С. 39–51.
22. Ртуть в почвах и растительности на заповедных территориях Приморского края / Н.В. Барановская, В.В. Иванов, Н.А., Осипова А.М. Паничев, И.Ю. Чекрызов, В.Д. Доронина, А.А. Хвощевская // Известия Томского политехнического университета. Инжиниринг георесурсов. – 2022. – Т. 333. – № 11. – С. 90–100.
23. Журкова И.С. Миграция ртути в пирогенных условиях // Известия Томского политехнического университета. Инжиниринг георесурсов. – 2020. – Т. 331. – № 7. – С. 63–70.
24. Mercury emissions from biomass burning in China / X. Huang, M. Li, H.R. Friedli, Y. Song, D. Chang, L. Zhu // Environmental Science and Technology. – 2011. – Vol. 45 (21). – P. 9442–9448. DOI: 10.1021/es202224e.

Информация об авторах

Анатолий Викторович Горбунов, старший научный сотрудник Геологического института РАН, Россия, 119017, г. Москва, Пыжевский пер., 7с1. anatolygor@yandex.ru; <https://orcid.org/0000-0001-7794-100X>

Дмитрий Борисович Петренко, кандидат химических наук, научный сотрудник Геологического института РАН, Россия, 119017, г. Москва, Пыжевский пер., 7с1; заведующий лабораторией экологической биохимии, доцент кафедры теоретической и прикладной химии Государственного университета просвещения, Россия, 141014, г. Мытищи, ул. Веры Волошиной, 24. dbpetrenko@yandex.by; <https://orcid.org/0000-0003-0640-5159>

Борис Владимирович Ермолаев, научный сотрудник Геологического института РАН, Россия, 119017, г. Москва, Пыжевский пер., 7с1. ermolaev-bv@mail.ru; <https://orcid.org/0000-0001-9072-312X>

Анна Александровна Дронова, младший научный сотрудник Геологического института РАН, Россия, 119017, г. Москва, Пыжевский пер., 7с1; аспирант кафедры теоретической и прикладной химии Государственного университета просвещения, Россия, 141014, г. Мытищи, ул. Веры Волошиной, 24. ann.drnv@mail.ru; <https://orcid.org/0000-0002-1232-9765>

Елизавета Владимировна Аристархова, младший научный сотрудник Геологического института РАН, Россия, 119017, г. Москва, Пыжевский пер., 7с1; аспирант кафедры теоретической и прикладной химии Государственного университета просвещения, Россия, 141014, г. Мытищи, ул. Веры Волошиной, 24. aristarkhova_lisa@mail.ru; <https://orcid.org/0009-0002-3826-9446>

Ольга Ильинична Окина, кандидат технических наук, ведущий научный сотрудник Геологического института РАН, Россия, 119017, г. Москва, Пыжевский пер., 7с1. okina@bk.ru; <https://orcid.org/0000-0002-1947-4551>

Поступила в редакцию: 25.10.2023

Поступила после рецензирования: 16.04.2024

Принята к публикации: 09.07.2024

REFERENCES

1. Yurkevich N.V., Eltsov I.N., Gureev V.N., Mazov N.A., Yurkevich N.V., Edelev A.V. Technogenic impact on the environment in the Russian Arctic on the example of the Norilsk Industrial district. *Bulletin of the Tomsk Polytechnic University. Geo Assets Engineering*, 2021, vol. 332. pp. 230–249. (In Russ.)
2. Sokolov Yu.I. The Arctic: to the problem of accumulated environmental damage. *Arktika: Ekologiya i ekonomika*, 2013, no. 2, pp. 18–27. (In Russ.)
3. Bogorodskaya A.V., Ponomareva T.V., Shapchenkova O.A., Shishikin A.S. Assessment of the state of soil microbial cenoses in the forest-tundra zone under conditions of airborne industrial pollution. *Eurasian Soil Science*, 2012, vol. 45, no 5, pp. 521–531. DOI: 10.1134/S106422931205002X.
4. Reznikova E. *Bellona «Nornikel»: ecological ambitious*, 2019. 31 p. (In Russ.) Available at <https://bellona.ru/publication/nornikel-ekologicheskie-ambitsii/> (accessed 01 October 2023).
5. Gismeteo: Weather in Russia. URL: <https://www.gismeteo.ru> (accessed 01 October 2023)
6. Zubareva O.N. Assessment of the distribution range of emissions in the zone of influence of the Norilsk Nickel group of enterprises based on plant analysis. *Evolution of the biosphere and technogenesis. Materials of the All-Russian conference*. Chita, August 22–28, 2016. Chita, Buryat Scientific Center SB RAS Publ., 2016. pp. 202–204. (In Russ.)
7. Bolshunova V.S., Rikhvanov L.P., Baranovskaya N.V. Elemental composition of lichens as an indicator of atmospheric pollution. *Ekologiya i promyshlennost Rossii*, 2014, vol. 11, pp. 26–31. (In Russ.)
8. Rola K., Latkowska E., Ogar W., Osyczka P. Towards understanding the effect of heavy metals on mycobion physiological condition in a widespread metal-tolerant lichen *Cladonia rei*. *ELSEVIER. Chemosphere*, 2022, vol. 308, pp. 1–9. DOI: 10.1016/j.chemosphere.2022.136365.
9. Nash T. H., Gries C. The use of lichens in atmospheric deposition studies with an emphasis on the arctic. *Science of the total environment*, 1995, vol. 160–161, pp. 729–736. DOI: 10.1016/0048-9697(95)04406-Q.
10. SS R 58595-2019. *Soils. Sampling*. Moscow, Standartinform Publ., 2019. 5 p. (In Russ.)
11. Nash T.H. Nutrients, elemental accumulation, and mineral cycling. *Lichen Biology*, 2008, pp. 234–251. DOI: 10.1017/CBO9780511790478.013.

12. SanPiN 1.2.3685-21. *Hygienic standards and requirements for ensuring the safety and (or) harmlessness of environmental factors for humans*. Moscow, GARANT Publ., 2021. 972 p. (In Russ.)
13. Grigorev N.A. *Distribution of chemical elements in the upper part of the continental crust*. Ekaterinburg, Ural branch of RAN Publ., 2009. 383 p. (In Russ.)
14. Kasimov N.S., Vlasov D.V. Clarks of chemical elements as reference standards in ecogeochemistry. *Vestnik Moskovskogo Universiteta ser. 5, geografiya*, 2015. no 2, pp. 7–18. (In Russ.)
15. Rudnick R.L., Gao S. Composition of the continental crust. *Treatise on Geochemistry*, 2014, vol. 3, pp. 1–51. DOI: 10.1016/B978-0-08-095975-7.00301-6.
16. Bačkor M., Loppi S. Interactions of lichens with heavy metals. *Biologia Plantarum*, 2009, vol. 53, no. 2, pp. 214–222. DOI: 10.1007/s10535-009-0042-y.
17. Kropacheva M.Yu., Mezina K.A., Belyanin D.K., Melgunov T.M.S., Makarova I.V. The first data on the distribution of isotopes, macro- and microelements from atmospheric precipitation in the lichens of the Arctic territories of Western Siberia. *Bulletin of the Tomsk Polytechnic University. Geo Assets Engineering*, 2022, vol. 333, pp. 46–56. (In Russ.)
18. Xue H., Chen W., Li M., Liu B., Li G., Han X. Assessment of major ions and trace elements in snow: a case study across northeastern China, 2017–2018. *Chemosphere*, 2020, vol. 251, pp. 126328. DOI: 10.1016/j.chemosphere.2020.126328.
19. Pozhitkov R., Moskovchenko D., Soromotin A., Kudryavtsev A., Tomilova E. Trace elements composition of surface snow in the polar zone of northwestern Siberia: the impact of urban and industrial emissions. *Environmental Monitoring and Assessment*, 2020, vol. 192, no. 4, pp. 215. DOI: 10.1007/s10661-020-8179-4.
20. Dodin D.A., Chernyshov N.M., Cherednakova O.I. *Metallogeny of platinoids of large regions of Russia*. Moscow, Geoinformmark Publ., 2001. 302 p. (In Russ.)
21. Purnal A.P. Anthropogenic toxification of the planet. *Sorosovskiy obrazovatelny zhurnal*, 1998, no. 9, pp. 39–51. (In Russ.)
22. Baranovskaya N.V., Ivanov V.V., Osipova N.A., Panichev A.M., Chekryzhov I.Yu., Doronina V.D., Khvashchevskaya A.A. Mercury in soils and vegetation in protected areas of Primorsky Krai. *Bulletin of the Tomsk Polytechnic University. Geo Assets Engineering*, 2022. vol. 333, pp. 90–100. (In Russ.)
23. Zhurkova I.S. Migration of mercury in pyrogenic conditions. *Bulletin of the Tomsk Polytechnic University. Geo Assets Engineering*, 2020, vol. 331, pp. 63–70. (In Russ.)
24. Huang X., Li M., Friedli H.R., Song Y., Chang D., Zhu L. Mercury emissions from biomass burning in China. *Environmental Science and Technology*, 2011, vol. 45 (21), pp. 9442–9448. DOI: 10.1021/es202224e.

Information about the authors

Anatoly V. Gorbunov, Senior Researcher, Geological Institute RAS, 7s1, Pyzhevsky lane, Moscow, 119017, Russian Federation. anatolygor@yandex.ru; <https://orcid.org/0000-0001-7794-100X>

Dmitry B. Petrenko, Cand. Sc., Researcher, Geological Institute RAS, 7s1, Pyzhevsky lane, Moscow, 119017, Russian Federation; Head of the Environmental Biochemistry Laboratory, Associate Professor, State University of Education, 24, Vera Voloshina street, Mytishchi, 141014, Russian Federation. dbpetrenko@yandex.by; <https://orcid.org/0000-0003-0640-5159>

Boris V. Ermolaev, Researcher, Geological Institute RAS, 7s1, Pyzhevsky lane, Moscow, 119017, Russian Federation. ermolaev-bv@mail.ru; <https://orcid.org/0000-0001-9072-312X>

Anna A. Dronova, Junior Researcher, Geological Institute RAS, 7s1, Pyzhevsky lane, Moscow, 119017, Russian Federation; Postgraduate Student, State University of Education, 24, Vera Voloshina street, Mytishchi, 141014, Russian Federation. ann.drnv@mail.ru; <https://orcid.org/0000-0002-1232-9765>

Elizaveta V. Aristarkhova, Junior Researcher, Geological Institute RAS, 7s1, Pyzhevsky lane, Moscow, 119017, Russian Federation; Postgraduate Student, State University of Education, 24, Vera Voloshina street, Mytishchi, 141014, Russian Federation. aristarkhova_lisa@mail.ru; <https://orcid.org/0009-0002-3826-9446>

Olga I. Okina, Cand. Sc., Leading Researcher, Geological Institute RAS, 7s1, Pyzhevsky lane, Moscow, 119017, Russian Federation. okina@bk.ru; <https://orcid.org/0000-0002-1947-4551>

Received: 25.10.2023

Revised: 16.04.2024

Accepted: 09.07.2024

UDC 551.583.7

DOI: 10.18799/24131830/2024/9/4439

Magnetic properties of lake Bannoe sediments (Southern Urals, Russia)

A.R. Yusupova[✉], N.G. Nurgalieva, D.M. Kuzina, O.S. Chernova, V.V. Antonenko

Kazan Federal University, Kazan, Russian Federation

[✉]i@ajusupova.ru

Abstract. Relevance. Lake sediments contain the unique data on mineral composition and physical properties reflecting environmental and climate changes over the past millennia. These data are extremely important for understanding the environmental processes today and in the future. Magnetic minerals and properties are considered as essential to reconstruct sediment supply and climate fluctuations. **Aim.** To reveal magnetic susceptibility and coercive spectrometric parameters as relevant for lake cores stratification in accordance with climate terms. **Object.** Core of Lake Bannoe sediments (length is 512 cm). The age of the core is ~12.5 thousand years old. **Materials and methods.** The magnetic susceptibility was measured using MFK-1A Kappabridge (AGICO). The hysteresis parameters of the studied sedimentary deposits were determined using a coercive spectrometer (J_mmeter). Induced magnetization based differential thermomagnetic analysis was performed on an auto-registering magnetic torsion balance using the zero method. **Results.** The magnetic susceptibility of sediments taken from Lake Bannoe ranges from 0.88 to 7,87·10⁻⁷ m³/kg. Differential thermomagnetic analysis revealed the presence of magnetite in these sediments. The Day–Dunlop plot indicated that the magnetic grains in the samples of Lake Bannoe are a mix of single-domain and multi-domain (pseudo-single-domain) particles, with multi-domain grains comprising 70 to 92% of the total. Variations in magnetic susceptibility and its components were analyzed in relation to the Holocene climatic stages as defined by the Blytt–Sernander classification. **Conclusions.** It is found that the variations in magnetic properties of the studied sediments are in harmony with climate stages of the Holocene. Sediments of Lake Bannoe recorded the Bond event #8 (~11100 years ago), as well as regional aridization events which occurred ~4500 and ~2000 years ago. The results obtained during this study complement already existing paleoclimatology data, which will be interesting to a wide range of researchers – from paleoclimatologists to limnologists and ecologists.

Keywords: magnetic study, paleoclimate, lacustrine sediments, Holocene, conditions of sedimentation

Acknowledgements: This study was funded by the Russian Foundation for Basic Research, project #20-35-90058. Part of the study was funded by the subsidy allocated to Kazan Federal University for the state assignment project no. FZSM-2023-0023 in the sphere of scientific activities.

For citation: Yusupova A.R., Nurgalieva N.G., Kuzina D.M., Chernova O.S., Antonenko V.V. Magnetic properties of lake Bannoe sediments (Southern Urals, Russia). *Bulletin of the Tomsk Polytechnic University. Geo Assets Engineering*, 2024, vol. 335, no. 9, pp. 40–50. DOI: 10.18799/24131830/2024/9/4439

УДК 551.583.7

DOI: 10.18799/24131830/2024/9/4439

Шифр специальности ВАК: 1.6.5

Магнитные свойства донных отложений озера Банное (Южный Урал, Россия)

А.Р. Юсупова[✉], Н.Г. Нурғалиева, Д.М. Кузина, О.С. Чернова, В.В. Антоненко

Казанский федеральный университет, Россия, г. Казань

[✉]i@ajusupova.ru

Аннотация. Актуальность. Известно, что вариации магнитных свойств донных отложений современных озер отражают условия окружающей среды: интенсивность поступления осадочного материала в бассейн седиментации, характер источников осадочного материала, колебания уровня озера, климат и другие условия озерного осадконакопления. Методи-

ки измерения параметров магнитных свойств отличаются относительной простотой и оперативностью, что делает их весьма удобным инструментом для детальной фиксации изменчивости свойств донных отложений озер, дальнейшего выявления сигналов и трендов изменений условий осадконакопления, расчленения и сопоставления озерных осадочных разрезов. **Цель:** изучение магнитно-минералогических свойств осадочных отложений озера Банное. **Объект.** Керн донных отложений озера Банное длиной 512 см, возраст которых составляет не менее 12,5 тыс. к.л.н. **Методы.** Магнитная восприимчивость получена с использованием MFK1 A Kappabridge (AGICO). Гистерезисные параметры исследуемых осадочных отложений были определены с помощью коэрцитивного спектрометра (J_meter). Дифференциальный термомагнитный анализ образцов по индуцированной намагниченности был выполнен на авторегистрирующих крутильных магнитных весах, действующих по нулевому методу. **Результаты.** Значения магнитной восприимчивости осадков озера Банное изменяются в диапазоне $(0,88-7,87) \cdot 10^{-7}$ м³/кг, озера. По кривым дифференциального термомагнитного анализа установлено присутствие в осадках магнетита. Согласно диаграмме Дзя–Данлопа магнитные зерна образцов озера Банное представляют собой комбинацию однодоменных и многодоменных (псевдооднодоменных) зерен с долей многодоменных от 70 до 92 %. Вариации магнитной восприимчивости и компонент магнитной восприимчивости рассмотрены в связи с климатическими стадиями голоцена по шкале Блитта–Сернандера. **Выводы.** Установлено, что вариации магнитных свойств изученных отложений согласуются с климатическими этапами голоцена по шкале Блитта–Сернандера. Вариации магнитных свойств осадков озера Банное коррелируют с глобальным событием Бонда 8 (~11100 к.л.н), а также отображают региональные события аридизации, которые произошли ~4500 и ~2000 лет назад. Полученные данные дополняют уже существующие климатологические данные и будут интересны широкому кругу исследователей – от палеоклиматологов до лимнологов и экологов.

Ключевые слова: магнитные методы, палеоклимат, озерные осадки, голоцен, условия осадконакопления

Благодарности: Работа выполнена при финансовой поддержке РФФИ в рамках научного проекта № 20-35-90058. Часть работ выполнено за счет средств субсидии, выделенной Казанскому федеральному университету для выполнения государственного задания – проект № FZSM-2023-0023 в сфере научной деятельности.

Для цитирования: Магнитные свойства донных отложений озера Банное (Южный Урал, Россия) / А.Р. Юсупова, Н.Г. Нургалиева, Д.М. Кузина, О.С. Чернова, В.В. Антоненко // Известия Томского политехнического университета. Инжиниринг георесурсов. – 2024. – Т. 335. – № 9. – С. 40–50. DOI: 10.18799/24131830/2024/9/4439

Introduction

Global, regional, and local ecological and geological information is recorded in lacustrine sediments [1]. A comprehensive study of lacustrine sediments can produce the most complete reconstruction of the sedimentation environment. Today, despite the growth in the number and depth of paleoclimatic studies, there is still a lack of data and material indicators (including magnetic and mineralogical indicators) on inland climate changes.

It is known that variations in the magnetic properties of modern lacustrine sediments reflect different environmental factors: inflow into the sedimentation basin; source of the sedimentary material; water level fluctuations; climate, and other sedimentary conditions [2]. Magnetic properties are relatively easy to measure, and this makes them a very convenient tool for detailed recording of variations in sediment properties, revealing changes and trends in sedimentary conditions, and correlation of sedimentary strata. These magnetic properties include magnetic susceptibility (MS) and normal-magnetization coercive spectra [3].

MS values are sensitive to the degree of weathering. During dry periods, erosion and chemical weathering slow down, which leads to a decrease in the magnetic content of the sediment [4]. On the other hand, during humid periods, chemical weathering and erosion intensify, which leads to higher values of MS. Thus, during warm/humid periods, higher MS values can be

expected, and vice versa [5]. Curves of magnetization norms determine the characteristics of hysteresis, domain structure, and size of ferrimagnetic grains [6], characterize the role of para-, ferro-, and superparamagnetic components to the induced magnetization and MS [7]. The paramagnetic component reflects the inflow of allothigenic material into the sedimentation basin, which in its turn correlates with the humidity level and the water level. The ferrimagnetic component is often represented by single-domain (SD) biogenic (authigenic) grains [2], as well as by multi-domain (MD) clastic material of an allothigenic nature.

The paramagnetic component has the greatest influence on the MS, because the ferromagnetic content in modern lacustrine sediments is usually small, and most biogenic materials, and water, are diamagnetic [3, 8]. The biogenic contribution to the MS is probably defined by the superparamagnetic component associated with the smallest (~30 nm) grain fraction [3].

Thus, magnetic properties of lacustrine sediments can be used to identify supply sedimentary material variations and hence climate and other environmental changes in the South Urals during the Quaternary [3, 8].

Sediments of less than 10 lakes in the Southern Urals were subjected to magnetic studies; the results of these studies were recorded in [8, 9]. The cyclical alternation of distinctive dry and wet periods, which was noted in the studied sediments, was due to the

water availability factor in steppes and forest-steppes of the Southern Urals.

The magnetic properties of sediments in Lake Bannoe were studied for the first time. A review of regional studies on lacustrine sediments shows that magnetic data can develop and complement existing common ideas about lacustrine sedimentary environments.

Materials and methods

The research aim is to study the MS and normal-magnetization coercive spectra of Lake Bannoe (South Urals) sediments in consideration of the Holocene climate stages.

The research objectives included the following:

- study the magnetic properties of the bottom sediments of Lake Bannoe;

- analyze MS variations and their reflection of climatic events and environmental trends;
- establish the characteristics of hysteresis, domain structure, and sizes of ferrimagnetic grains;
- evaluate the role of the contribution of magnetic parameters (k_{para} -, k_{ferro} -, and k_{super} to the total MS) and fluctuations of the biogenic component during periods of aridization and humidification in the South Urals.

Lake Bannoe ($53^{\circ}35'48.13''N$ $58^{\circ}37'47.28''E$) is located in the Southern Urals (Fig. 1). The altitude of the lake is 434 m, the width is ~ 1.9 km, the length is ~ 4.2 km, and the basin area is 36.3 km^2 . The lake is of tectonic origin [10].

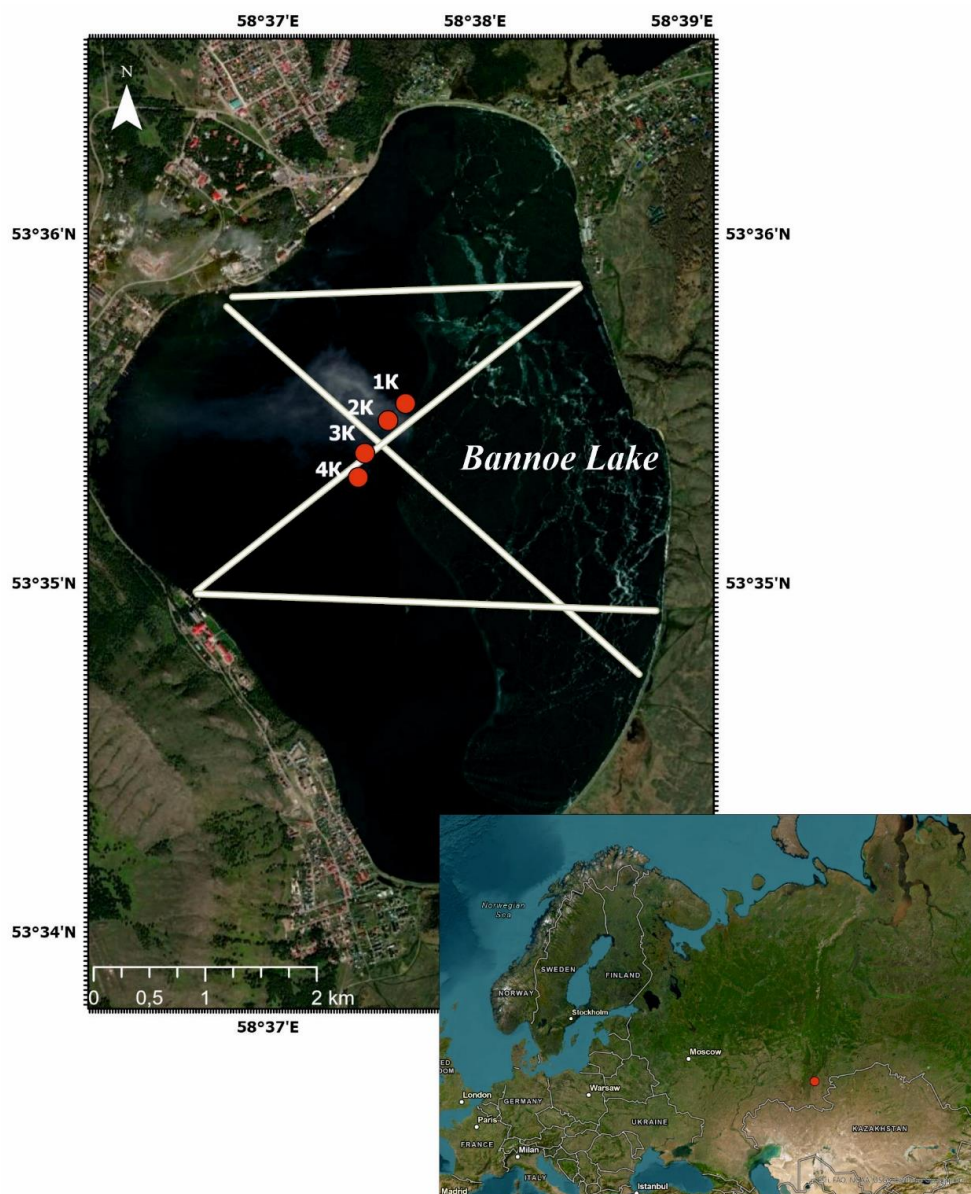


Fig. 1. Location of Lake Bannoe, selected core columns and seismoacoustic profiles

Рис. 1. Расположение озера Банное, отобранных керновых колонок и сейсмоакустических профилей

The drill cores were collected with a hydraulic sampler, described in detail in [11]. The basic principle lies in pressing the core barrel into the sediment with hydraulic force and extraction of quality core samples up to 5.5 meters long. The sampling location was selected based on seismoacoustic data (the area of undisturbed layering).

Four core columns with length from 380 to 512 cm (Fig. 1, Table 1) were selected based on acoustic studies [8, 9, 12]. The total number of taken samples was 954, with a sampling step of 2 cm.

Table 1. Basic information about the sampling points
Таблица 1. Основные сведения точек отбора керна

Coordinates Координаты	Core length (m) Длина керна (м)	Number of samples (pcs) Количество образцов (шт.)
N 53°35'30.93" 53°35'30.93" с.ш. E 58°37'39.97" 58°37'39.97" в.д.	3.80	190
N 53°35'27.87" 53°35'27.87" с.ш. E 58°37'34.75" 58°37'34.75" в.д.	5.08	254
N 53°35'22.36" 53°35'22.36" с.ш. E 58°37'28.22" 58°37'28.22" в.д.	5.08	254
N 53°35'18.08" 53°35'18.08" с.ш. E 58°37'26.08" 58°37'26.08" в.д.	5.12	256

The sediment section of Lake Bannoe is represented (from bottom to top) by gray-blue clay with shell fragments (the interval of 508–466 cm, 42 cm thick) and dark green to gray-green silt (the of interval 466–0 cm, 466 cm thick).

The lake age model was constructed based on the radiocarbon dating of 9 samples. According to the model, the lacustrine sediment record in investigated column can be estimated by duration ~12.5 thousand years old [8, 13].

The MS was measured in 954 dried samples of 2–15 g weight at room temperature from all the core columns using MFK-1A Kappabridge (Advanced Geoscience instrument company (AGICO)). The measurements were carried out at a standard frequency of 976 Hz. The obtained values of the MS were normalized by sample weight.

MS values in sediments depend on the weathering process. Drought periods slow down erosion and chemical weathering, which reduces the content of magnetic minerals in the sediment [4]. On the other

hand, humid periods are characterized by active chemical weathering and erosion, which results in higher MS values. Therefore, high MS values can be expected during warm/humid periods, and vice versa [5].

The hysteresis parameters of the studied sedimentary deposits were determined using a coercive spectrometer (J_meter) [7, 14]. The J_r channel (residual magnetization) has a sensitivity of $\sim 1 \cdot 10^{-8} \text{ A} \cdot \text{m}^2$; the J_i channel (inductive magnetization) has a sensitivity of $\sim 1 \cdot 10^{-6} \text{ A} \cdot \text{m}^2$. The maximum magnetizing field induction is 1.5 mT.

The hysteresis parameters reflect the size of magnetic grains, which depends on physical and chemical conditions in the sedimentary environment [6, 15]. Therefore, the magnetic hysteresis loop can be used to determine the domain state and the approximate size of magnetic particles [16] in order to assess the contribution of paramagnetic minerals to the magnetic behavior of sediments [17].

Coercive spectrometry was used as a primary method to study 510 samples taken from core columns # 3 and # 4. The hysteresis parameters (saturation magnetization (M_s), saturation remanence (M_{rs}), and coercivity (B_c)) were determined from hysteresis curves, whereas the coercivity remanence (B_{cr}) was determined from the magnetic backfield curve. These parameters were used, among others, to infer the magnetic domain state as well as the predominant grain size of ferrimagnetic minerals.

The magnetic hysteresis parameters reflect the size of magnetic particles, the composition of magnetic grains [3, 6, 15] and the contribution of paramagnetic (k_{para}), ferromagnetic (k_{ferro}) and superparamagnetic (k_{super}) components to the MS [3]. Allothigenic material is considered as the primary source of k_{para} , while the k_{ferro} and k_{super} components can be of mixed (allothigenic and/or authigenic) nature [3].

Thermomagnetic analysis is used for diagnosing the composition of the ferrimagnetic fraction in rocks [7, 14, 18]. Induced magnetization based on differential thermomagnetic analysis (DTMA) [18] was performed on an auto-registering magnetic torsion balance using the zero method. Before measurements, the dried sample was grinded and placed in a measuring container – a quartz tube, 3–4 cm long and 3–5 mm in diameter. Each sample was heated twice in a magnetic field of 0.5 mT at a heating rate of 100°C/min. The result was the temperature dependences of the induced magnetization $J_i(T)$ obtained during the first and second heating.

Electron microscopy was carried out at the Interdisciplinary Center for Analytical Microscopy (Kazan Federal University). The morphology and elemental composition of magnetic particles in the

Lake Bannoe sediments were studied using the Carl Zeiss “Merlin” field emission scanning electron microscope equipped with the Aztec X-MAX (for elemental analysis) detector. The resolution was 127 eV.

Results

Fig. 2 presents the MS measurement results. The MS values of core column # 1 vary in the range of $(0.88\text{--}3.58) \cdot 10^{-7} \text{ m}^3/\text{kg}$. The MS of core column # 2 vary in the range of $(1.01\text{--}4.49) \cdot 10^{-7} \text{ m}^3/\text{kg}$. The MS values for core column # 3 vary from $0.93 \cdot 10^{-7}$ to

$3.63 \cdot 10^{-7} \text{ m}^3/\text{kg}$. The MS values of core column # 4 vary from $1.05 \cdot 10^{-7}$ to $7.87 \cdot 10^{-7} \text{ m}^3/\text{kg}$.

High values of magnetic susceptibility were recorded at a depth of 508–480 cm in core sample # 2 and at a depth of 486–512 cm in core sample # 4, which may be due to an increased supply of allothigenic material to the sedimentation basin. DTMA revealed that magnetic minerals at these depths are mainly represented by magnetite, which was confirmed by the results of SEM (Fig. 3, 4).

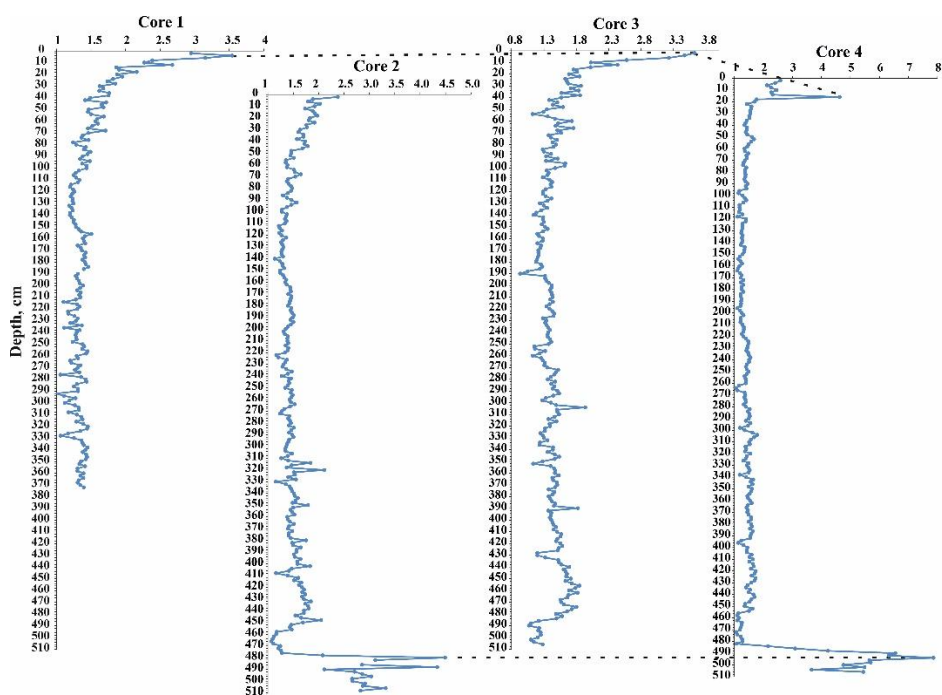


Fig. 2. Variations of MS ($\cdot 10^{-7} \text{ m}^3/\text{kg}$) with depth

Рис. 2. Вариации магнитной восприимчивости озера Банное по глубине ($\cdot 10^{-7} \text{ м}^3/\text{кг}$)

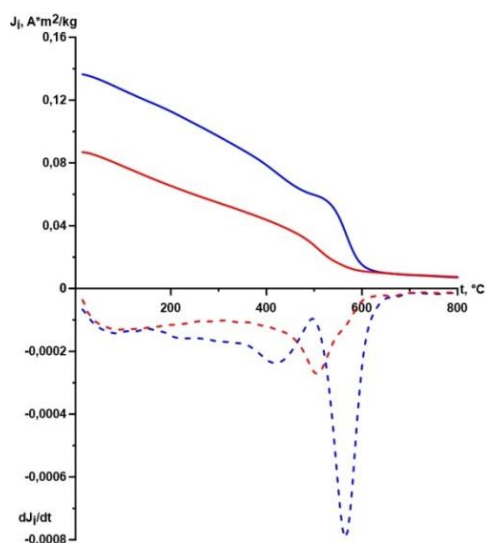


Fig. 3. DTMA results for core piece # 1053 taken from core sample # 4. Blue line indicates the first heating, red line is for the second heating; solid lines are integral curves, dotted lines are differential curves

Рис. 3. Результаты дифференциального терромагнитного анализа образца 1053 керна колонки № 4. Сплошная синяя линия – первый нагрев, сплошная красная – второй нагрев; пунктирная синяя линия – дифференциал первого нагрева, пунктирная красная – дифференциал второго нагрева

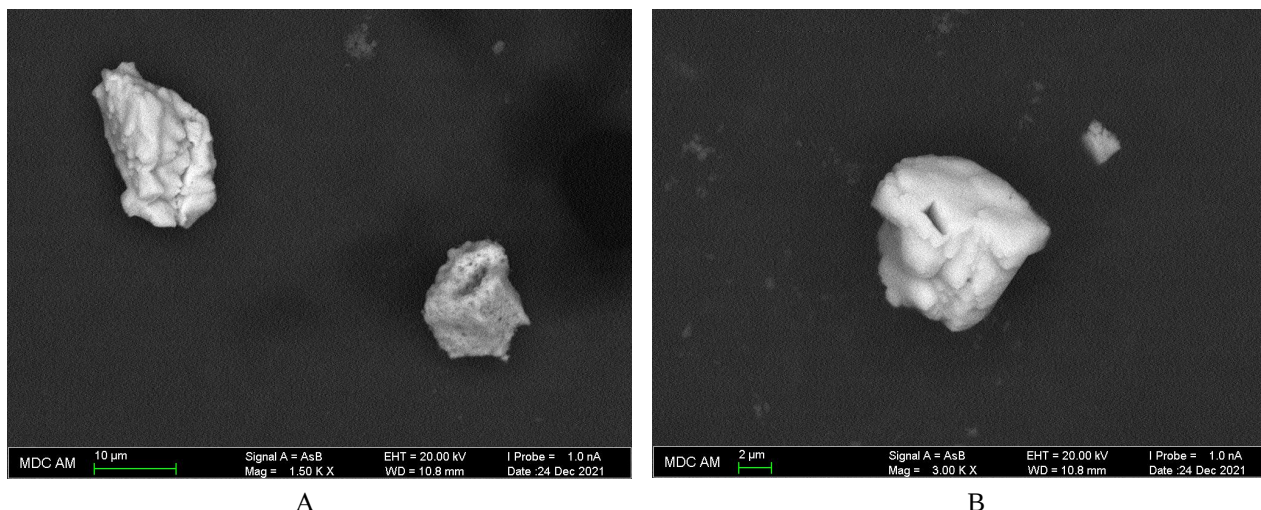


Fig. 4. Electron microscopy images of detrital magnetite at a depth of 500 cm in the Lake Bannoe, atom. %: A) Fe – 27.36; O – 54.32; C – 18.09; Al – 0.08; Si – 0.11; Cu – 0.11; B) Fe – 42.66; O – 47.15; C – 9.81; Al – 0.14; Si – 0.05; Cu – 0.19
Рис. 4. Электронно-микроскопические снимки обломочного магнетита на глубине 500 см озера Банное, атом. %: A) Fe – 27.36; O – 54.32; C – 18.09; Al – 0.08; Si – 0.11; Cu – 0.11; B) Fe – 42.66; O – 47.15; C – 9.81; Al – 0.14; Si – 0.05; Cu – 0.19

The Day–Dunlop plot [6, 15] (Fig. 5) shows the magnetic hysteresis parameters obtained for two core columns (# 3 and 4).

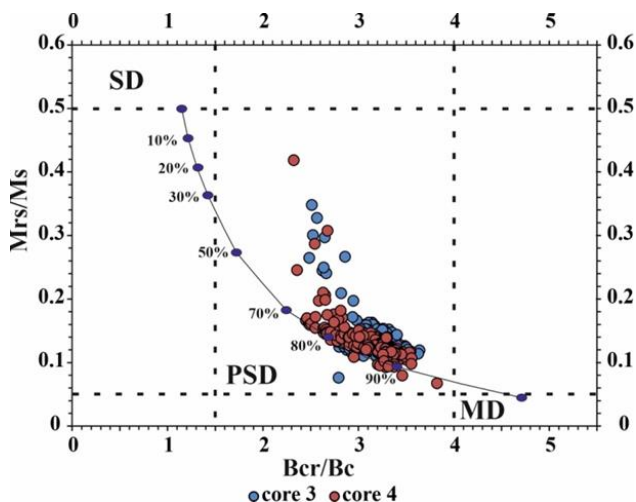


Fig. 5. Day–Dunlop plot [6, 15]: blue circles refer to core column # 3, red circles refer to core column # 4

Рис. 5. Диаграмма Дэя–Данлопа [6, 15] для керновых колонок: синие кружочки – керновая колонка № 3, красные – № 4

Alternatively, the proximity of the samples to the mixing curve implies that the magnetic grains could be a combination of SD and MD (PSD) grains with a MD proportion between 70 and 92% [15].

The MS components determined for core sample # 3 changes with depth (Fig. 6).

The Younger Dryas is characterized by low values of magnetic susceptibility, which vary from $1.1 \cdot 10^{-7}$ to

$1.28 \cdot 10^{-7} \text{ m}^3/\text{kg}$. The contributions of para-, ferro-, and superparamagnetic components are also relatively low with averages of $6.71 \cdot 10^{-5}$ and $2.03 \cdot 10^{-5}$, and $0.03 \cdot 10^{-5}$, respectively.

The Preboreal is characterized by an increase in the values of magnetic susceptibility (up to $1.8 \cdot 10^{-7} \text{ m}^3/\text{kg}$). The contributions of para-, ferro- and superparamagnetic components also increase; their average values are $6.64 \cdot 10^{-5}$ and $4.05 \cdot 10^{-5}$, $0.04 \cdot 10^{-5}$, respectively.

In the Boreal, there is again an increase in the MS values (to $1.85 \cdot 10^{-7} \text{ m}^3/\text{kg}$) and the contribution of para- and ferromagnetic components. In this stage, the maximum values of the paramagnetic and ferromagnetic components reach $8.3 \cdot 10^{-5}$ and $6.75 \cdot 10^{-5}$, respectively.

The Atlantic stage corresponds to an increase in the MS values up to $1.94 \cdot 10^{-7} \text{ m}^3/\text{kg}$. At this stage, the maximum value of the paramagnetic component is also recorded ($9.18 \cdot 10^{-5}$). An increase in the values of magnetic susceptibility and the paramagnetic component may indicate increased input of allothigenic material into the lake. The superparamagnetic component also becomes more explicit, and its value ranges between $0.03 \cdot 10^{-5}$ and $0.06 \cdot 10^{-5}$.

With the beginning of the Subboreal, a decrease in the values of magnetic parameters is observed: magnetic susceptibility varies from $0.93 \cdot 10^{-7}$ to $1.63 \cdot 10^{-7} \text{ m}^3/\text{kg}$, the paramagnetic component varies from 5.05 to $7.4 \cdot 10^{-5}$. The superparamagnetic component ranges between 0.02 and $0.07 \cdot 10^{-5}$. The decrease in the values of magnetic parameters characterizes the climate change during this stage. The ferromagnetic component at the end of the Subboreal increases to the maximum of $7.88 \cdot 10^{-5}$.

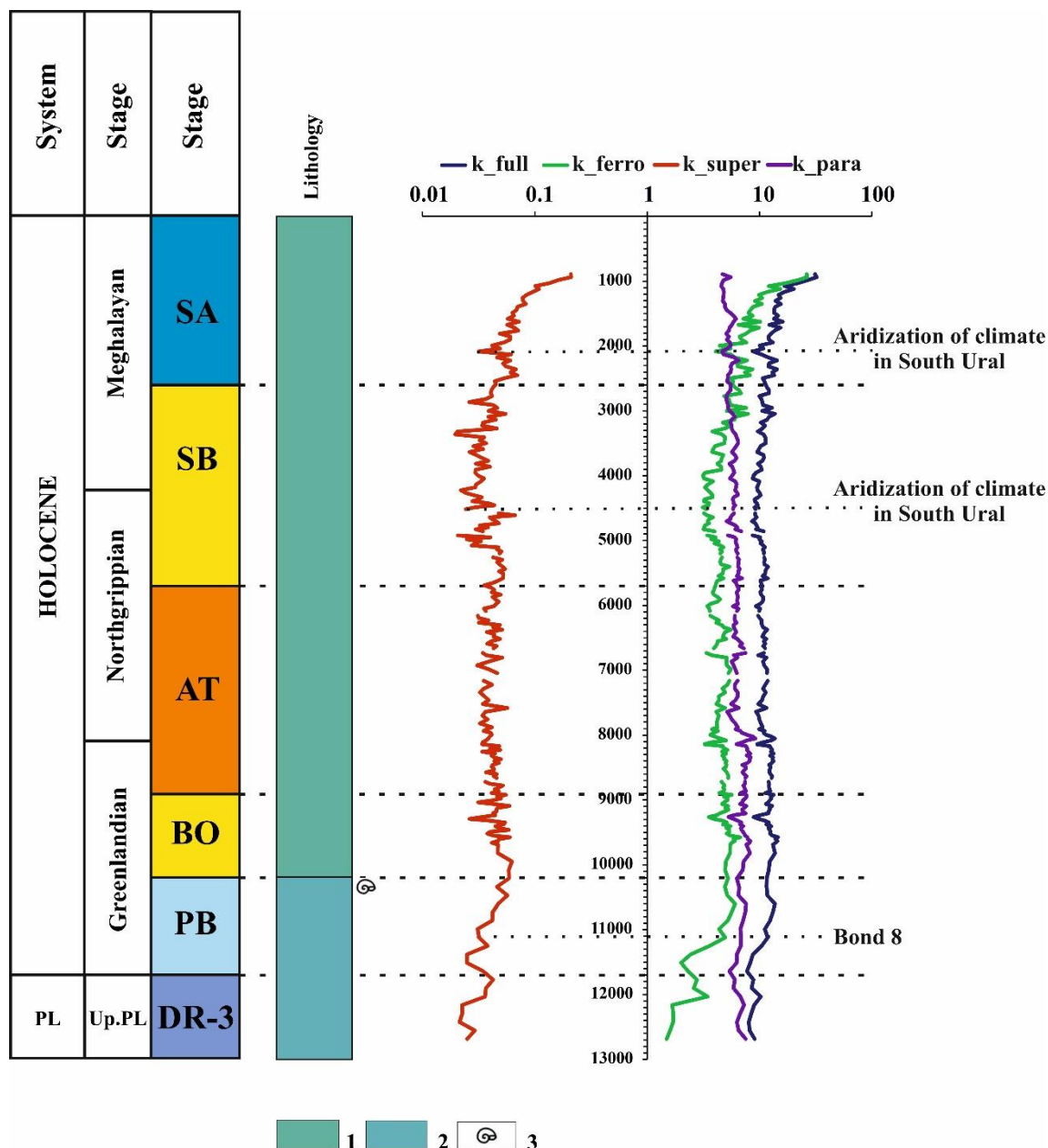


Fig. 6. Variations of magnetic parameters obtained for core sample # 3 in context of the Blytt-Sernander classification [19–22]. Legend: 1 – dark green silt; 2 – gray-blue clay; 3 – shells

Рис. 6. Вариации магнитных параметров образцов керновой колонки № 3 в связи с климатической стадийностью Блитта–Сернандера [19–22]. Условные обозначения: 1 – темно-зеленый ил; 2 – серо-голубая глина; 3 – раковинный детрит

The Subatlantic is characterized by an increase in the MS values (to $3.63 \cdot 10^{-7} \text{ m}^3/\text{kg}$), the ferromagnetic component (to $9.47 \cdot 10^{-5}$) and the superparamagnetic component (to $0.21 \cdot 10^{-5}$). The values of the paramagnetic component, on the other hand, decrease (with average of $6.49 \cdot 10^{-5}$), which indicates a decrease in the supply of paramagnetic minerals (silicates) to the lake. An increase in the values of MS and the ferromagnetic component can be associated with either an increased input of allothigenic material, the contribution of lake biota or anthropogenic pollution [3].

Discussion

The variations in MS, k_{para} and k_{ferro} components were analyzed in context of the Blytt-Sernander classification [20–22] (Fig. 4). The Blytt-Sernander classification is a series of north European climatic periods or phases based on the study of Danish peat bogs by Axel Blytt and Rutger Sernander.

Magnetic susceptibility and its components vividly respond to any changes in the supply of allothigenic material, which in turn is sensitive to changes in humidity [2, 9].

Low values of MS are characteristic of the Younger Dryas. The contributions of k_{para} , k_{ferro} and k_{super} components are also relatively small. Low values such as these can indicate cold and dry climate.

The Preboreal is known for significant climate warming and rise in the world sea level [23]. This stage is also characterized by increased MS, k_{para} , k_{ferro} , and k_{super} components. An increase in the values indicates a transition from cold and dry climate of the Late Pleistocene to warm and humid conditions of the Holocene [4]. The Bond global event [24] synchronized with an increase in k_{ferro} values (Fig. 4) due to allothigenic and authigenic sedimentary material filling the newly formed lake basin.

During the Boreal, an increase in MS and the contributions of k_{para} and k_{ferro} components can be observed. An increase in MS and k_{para} , k_{ferro} and k_{super} components implies an increased inflow of allothigenic material into the sedimentation basin. The study of sedimentary deposits in Lake Syrytkul (South Ural, Russia) [25] showed that the climate in the South Urals was warm and dry ~10300–~9000 years ago.

The Atlantic is characterized by increased MS and k_{para} component. This may indicate an increased inflow of allothigenic material into the lake basin [4]. Therefore, we can assume that the climate continued to reflect warm-and-humid trend. This trend is confirmed by data on Lake Ufimskoe (South Ural, Russia) obtained for the interval of time between ~9000 and ~5800 years ago [26]. The local drop of MS which occurred ~8000 years ago reflects a decrease in climate humidity recorded as a significant increase in the organic content in sediments of Lake Turgoyak (South Ural, Russia) [27].

At the beginning of the Subboreal, a decrease in the magnetic parameters (MS and k_{para} component) indicates the climate change, namely, a decrease in humidity. Aridization in the Subboreal (~4,500 years ago) is confirmed by diatom analysis data from Lake Ufimskoe [26].

The Subatlantic is characterized by an increase in MS and the k_{ferro} component. The k_{para}

component, on the other hand, decreases, which indicates a decrease in the paramagnetic mineral (silicate) inflow to the lake. An increase in the values of MS, the k_{ferro} , and k_{super} can be associated with either an increased input of allothigenic material or the contribution of lake biota [4]. Decreased input of allothigenic material is explained by aridization, which took place ~2000 years ago. This is consistent with regional data on Lake Syrytkul and Lake Talkas (South Ural, Russia) [27, 28].

Conclusion

The magnetic properties of sediments in Lake Bannoe were studied for the first time. The analysis of the MS variations showed that they reflect climate events and environmental trends. The hysteresis parameters, the domain structure and ferrimagnetic grain sizes were obtained using the curves of normal-magnetization.

Also the contribution of magnetic parameters such as k_{para} -, k_{ferro} -, and k_{super} components to the total MS were obtained.

The inflow of allothigenic clastic material into the sedimentation basin is reflected in variations of the paramagnetic and superparamagnetic content. The k_{ferro} component is represented by SD grains (presumably of authigenic origin) and MD clastic grains. Variations in the biogenic component correlate with the total bioproductivity of the lake and variations in the summer paleotemperature. The periods of aridization and humidization in the South Urals identified during the study are compared with the Blytt–Sernander classification. Variations in magnetic properties of sediments in Lake Bannoe reflect the Bond event #8 (~11100 years ago) and regional aridization events which occurred ~4500 years ago and ~2000 years ago.

The results obtained during this study complement already existing paleoclimatology data, which will be interesting to a wide range of researchers - from paleoclimatologists to limnologists and ecologists.

REFERENCES

1. Solotchin P.A. *Lithological and mineralogical chronicles of bottom sediments of lakes of the Siberian region as the basis of paleoclimatic reconstructions*. Dr. Diss. Novosibirsk, 2023. 237 p. (In Russ.)
2. Evans M., Heller F. *Environmental Magnetism. Principles and Applications of Enviromagnetics*, 2003. 299 p.
3. Kosareva L., Nourgaliev D., Kuzina D., Spassov S., Fattakhov A. Ferromagnetic, dia-/paramagnetic and superparamagnetic components of Aral sea sediments: Significance for paleoenvironmental reconstruction. *ARP. Journal of Earth Sciences*, 2015, vol. 4, no. 1, pp. 1–6.
4. Ranasinghe P., Ortiz J., Smith A., Griffith E., Siriwardana C., De Silva S., Wijesundara D. Mid- to late-Holocene Indian winter monsoon variability from a terrestrial record in eastern and southeastern coastal environments of Sri Lanka. *The Holocene*, 2013, vol. 23, no. 7, pp. 945–960. Available at: <https://doi.org/10.1177/0959683612475141> (accessed 15 October 2023).
5. An Z.S., Kukla G., Porter S.C., Xiao J. Magnetic susceptibility evidence of monsoon variation in the Loess Plateau of central China during the last 130000 years. *Quaternary Research*, 1991, vol. 36, pp. 29–36. Available at: [https://doi.org/10.1016/0033-5894\(91\)90015-W](https://doi.org/10.1016/0033-5894(91)90015-W) (accessed 15 October 2023).

6. Dunlop D. Theory and application of the Day plot (M-rs/M-s versus H-cr/H-c). *J. Geophys. Res. S Solid Earth*, 2002, vol. 107, pp. 2046–2067. Available at: <https://doi.org/10.1029/2001JB000487> (accessed 15 October 2023).
7. Burov B.V., Nurgaliev D.K., Yasonov P.G. *Paleomagnetic analysis*. Kazan, Kazan State University Press, 1986. 167 p. (In Russ.)
8. Yusupova A.R., Nurgalieva N.G., Kuzina D.M., Rogov A.M., Nigamatzyanova G.R. Lithological features of Lake Bannoe sediments (Southern Urals) as an indicator of environmental and climate changes in the Holocene. *Lithosphere*, 2024, vol. 24, no. 1, pp. 173–194. (In Russ.) Available at: <https://doi.org/10.24930/1681-9004-2024-24-1-173-194> (accessed 15 October 2023).
9. Yusupova A. R., Nurgalieva N. G., Kuzina D. M., Kosareva L. R., Yunusova D. A. Features of the material composition of Lake Sabakty sediments (Southern Urals). *Advances in current natural sciences*, 2023, no. 7, pp. 72–81. (In Russ.) Available at: <https://doi.org/10.17513/use.38074> (accessed 15 October 2023).
10. Gareev A. *Rivers and lakes of Bashkortostan*. Ufa, Kitap Publ., 2001, 260 p. (In Russ.)
11. Borisov A.S. *A system of technological support for paleomagnetic studies of modern lake sediments*. Dr. Diss. Abstract. Kazan, 2004. 46 p. (In Russ.)
12. Krylov P.S., Nurgaliev D.K., Yasonov P.G. Seismoacoustic research of lake Bannoe bottom sediments (South Ural, Russia). *ARN Journal of Engineering and Applied Sciences*, 2020, vol. 15, no. 1, pp. 133–135.
13. Yusupova A.R., Nourgalieva N.G. Geochemical basis of climate change indication in the Holocene sediments of Lake Bannoe (Southern Urals, Russia). *Uchenye Zapiski Kazanskogo Universiteta. Seriya Estestvennye Nauki*, 2021, vol. 163, no. 3, pp. 514–526. (In Russ.) Available at: <https://doi.org/10.26907/2542-064X.2021.3.514-526> (accessed 15 October 2023).
14. Nurgaliev D.K., Yasonov P.G. *Coercive spectrometer*. Patent RF, no. 81805, 2009. (In Russ.)
15. Day R., Fuller M., Schmidt V. Hysteresis properties of titanomagnetites: grain-size and compositional dependence. *Physics of the Earth and Planetary Interiors*, 1977, vol. 13, pp. 260–267. Available at: [http://dx.doi.org/10.1016/0031-9201\(77\)90108-X](http://dx.doi.org/10.1016/0031-9201(77)90108-X) (accessed 15 October 2023).
16. Guanhua L., Dunsheng X., Youjun W., Hao L., Zhongping L. A combined study of magnetic, granulometric and geochemical properties from lacustrine sediment in the arid Central Asia: implications for paleoenvironmental variations. *Journal of Applied Geophysics*, 2022, vol. 199, pp. 1–12. Available at: <https://doi.org/10.1016/j.jappgeo.2022.104589> (accessed 15 October 2023).
17. Matasova G.G., Kazansky A.Y., Shchetnikov A.A., Filinov I.A., Berdnikova N.E., Berdnikov I.M. Sedimentation and environmental dynamics of the Tunka rift valley (Baikal region) in the Late Pleistocene-Holocene based on the analysis of lithological and rock magnetic properties of the deposits from Upper Paleolithic sites. *Archaeological Research in Asia*, 2021, vol. 26, pp. 1–19. Available at: <https://doi.org/10.1016/j.ara.2021.100266> (accessed 15 October 2023).
18. Burov B.V., Yasonov P.G. *Introduction to differential thermomagnetic analysis of rocks*. Kazan, KSU Publ., 1981. 168 p. (In Russ.)
19. Gradstein F.M. Ogg J.G., Schmitz M. D., Ogg G.M. *The geologic time scale 2020*. Ed. by F.M. Gradstein. Elsevier, 2020. Vol. 2, 1390 p.
20. Blytt A. *Essay on the immigration of the Norwegian flora during alternating rainy and dry periods*. Christiania (Oslo), Cammermeyer, 1876. 89 p.
21. Blytt A. *Forsøg til en teori om indvandringen af Norges flora under vexlende regnfulde og tørre Tider*. Nyt Mag. Naturvid. Christiania (Oslo), 1876. Vol. 21, pp. 279–362.
22. Sernander R. *Studier öfver den gotländska vegetationens utvecklingshistoria*. Uppsala, Akademisk afhandling, 1984. 112 p.
23. Rudoy A.N. Hydrosphere catastrophes in modern of the earth. *Tomsk State Pedagogical University Bulletin*, 2000, vol. 2, no. 18, pp. 15–21.
24. Bond G., Showers W., Cheseby M., Lotti R., Almasi P., Demenocal P., Priore P., Cullen H., Hajdas I., Bonani G. A pervasive millennial-scale cycle in north Atlantic Holocene and glacial climates. *Science*, 1997, vol. 278, no. 5341, pp. 1257–1266. Available at: <https://doi.org/10.1126/science.278.5341.1257> (accessed 15 October 2023).
25. Maslennikova A.V., Udachin V.N., Aminov P.G. Lateglacial and Holocene environmental changes in the Southern Urals reflected in palynological, geochemical and diatom records from the lake Syrytkul sediments. *Quaternary International*, 2016, vol. 420, pp. 65–75. Available at: <https://doi.org/10.1016/j.quaint.2015.08.062> (accessed 15 October 2023).
26. Maslennikova A.V., Udachin V.N. Lakes ecosystem response to Holocene climate changes and human impact in the Southern Urals: diatom and geochemical proxies. *The Holocene*, 2016, vol. 27, no. 6, pp. 847–859. Available at: <https://doi.org/10.1177/095968361667594> (accessed 15 October 2023).
27. Maslennikova A.V., Udachin V.N., Deryagin V.V., Shtenberg M.V. Reconstruction of Turgoyak lake (the Southern Urals) ecosystem changes in holocene. *Lithosphere*, 2018, vol. 6, pp. 914–927. (In Russ.) Available at: <https://doi.org/10.24930/1681-9004-2018-18-6-914-927> (accessed 15 October 2023).

28. Maslennikova A.V., Udachin V.N., Deryagin V.V. *Palaeoecology and geochemistry of lakes sedimentation of Holocene in Urals*. Ekaterinburg, UB RAS Publ., 2014. 136 p. (In Russ.)

Information about the authors

Anastasia R. Yusupova, Cand. Sc., Senior Researcher, Kazan Federal University, 4/5, Kremlevskaya street, Kazan, 420008, Russian Federation. <https://orcid.org/0000-0001-8732-3053>; i@ajusupova.ru

Nuriia G. Nurgalieva, Dr. Sc., Professor, Kazan Federal University, 4/5, Kremlevskaya street, Kazan, 420008, Russian Federation. <https://orcid.org/0000-0003-4372-9777>; nurgal07@mail.ru

Dilyara M. Kuzina, Cand. Sc., Senior Researcher, Kazan Federal University, 4/5, Kremlevskaya street, Kazan, 420008, Russian Federation. <https://orcid.org/0000-0003-1626-4636>; di.kuzina@gmail.com

Olga S. Chernova, Research Assistant, Kazan Federal University, 4/5, Kremlevskaya street, Kazan, 420008, Russian Federation. OSChernova@kpfu.ru

Vadim V. Antonenko, Research Assistant, Kazan Federal University, 4/5, Kremlevskaya street, Kazan, 420008, Russian Federation. <https://orcid.org/0000-0002-2311-089X>; ghost.over.the.sea@gmail.com

Received: 23.10.2023

Revised: 09.11.2023

Accepted: 09.07.2024

СПИСОК ЛИТЕРАТУРЫ

1. Солотчин П.А. Литолого-минералогические летописи донных отложений озер Сибирского региона как основа палеоклиматических реконструкций: дис. ... д-ра геол.-минерал. наук. – Новосибирск, 2023. – 237 с.
2. Evans M., Heller F. Environmental magnetism. Principles and applications of enviromagnetism. – 2003. – 299 p.
3. Ferromagnetic, dia-/paramagnetic and superparamagnetic components of Aral sea sediments: Significance for paleoenvironmental reconstruction / L. Kosareva, D. Nourgaliev, D. Kuzina, S. Spassov, A. Fattakhov // ARPN. Journal of Earth Sciences. – 2015. – Vol. 4. – № 1. – P. 1–6.
4. Mid- to late-Holocene Indian winter monsoon variability from a terrestrial record in eastern and southeastern coastal environments of Sri Lanka / P. Ranasinghe, J. Ortiz, A. Smith, E. Griffith, C. Siriwardana, S. De Silva, D. Wijesundara // The Holocene. – 2013. – Vol. 23. – № 7. – P. 945–960. URL: <https://doi.org/10.1177/0959683612475141> (дата обращения 15.10.2023).
5. Magnetic susceptibility evidence of monsoon variation in the Loess Plateau of central China during the last 130000 years / Z.S. An, G. Kukla, S.C. Porter, J. Xiao // Quaternary Research. – 1991. – Vol. 36. – P. 29–36. URL: [https://doi.org/10.1016/0033-5894\(91\)90015-W](https://doi.org/10.1016/0033-5894(91)90015-W) (дата обращения 15.10.2023).
6. Dunlop D. Theory and application of the Day plot (M_{rs}/M_s versus H_{cr}/H_c) // J. Geophys. Res. S Solid Earth. – 2002. – Vol. 107. – P. 2046–2067. URL: <https://doi.org/10.1029/2001JB000487> (дата обращения 15.10.2023).
7. Буров Б.В., Нурғалиев Д.К., Ясонов П.Г. Палеомагнитный анализ. – Казань: Изд-во КГУ, 1986. – 167 с.
8. Литологические особенности донных отложений озера Банное (Южный Урал) как индикатор изменений природной среды и климата голоцена / А.Р. Юсупова, Н.Г. Нурғалиева, Д.М. Кузина, А.М. Рогов, Г.Р. Нигаматзянова // Литосфера. – 2024. – Vol. 24. – № 1. – С. 173–194. URL: <https://doi.org/10.24930/1681-9004-2024-24-1-173-194> (дата обращения 15.10.2023).
9. Особенности вещественного состава донных отложений озера Сабакты (Южный Урал) / А.Р. Юсупова, Н.Г. Нурғалиева, Д.М. Кузина, Л.Р. Косарева, Д.А. Юнусова // Успехи современного естествознания. – 2023. – № 7. – С. 72–81. URL: <https://doi.org/10.17513/use.38074>
10. Гареев А.М. Реки и озера Башкортостана. – Уфа: Китап, 2001. – 259 с.
11. Борисов А.С. Система технологического обеспечения палеомагнитных исследований отложений современных озер: автореф. дис. ... д-ра геол.-минерал. наук. – Казань, 2004. – 46 с.
12. Krylov P.S., Nurgaliev D.K., Yasonov P.G. Seismoacoustic research of lake bannoe bottom sediments (South Ural, Russia) // ARPN Journal of Engineering and Applied Sciences. – 2020. – Vol. 15. – № 1. – P. 133–135.
13. Юсупова А.Р., Нурғалиева Н.Г. Геохимическая основа индикации изменения климата по голоценовым донным отложениям озера Банное (Южный Урал) // Учен. зап. Казан. ун-та. Сер. Естеств. науки. – 2021. – Т. 163. – Кн. 3. – С. 514–526. URL: <https://doi.org/10.26907/2542-064X.2021.3.514-526> (дата обращения 15.10.2023).
14. Полезная модель «Коэрцитивный спектрометр»: пат. № 81805 Российская Федерация, № 2008125924/22; заявл. 17.06.2008; опубл. 27.03.2009, Бюл. ФИПС № 9. – 20 с.
15. Day R., Fuller M., Schmidt V. Hysteresis properties of titanomagnetites: grain-size and compositional dependence // Physics of the Earth and Planetary Interiors. – 1977. – Vol. 13. – P. 260–267. URL: [http://dx.doi.org/10.1016/0031-9201\(77\)90108-X](http://dx.doi.org/10.1016/0031-9201(77)90108-X) (дата обращения 15.10.2023).
16. A combined study of magnetic, granulometric and geochemical properties from lacustrine sediment in the arid Central Asia: Implications for paleoenvironmental variations / L. Guanhu, X. Dunsheng, W. Youjun, L. Hao, L. Zhongping // Journal of Applied Geophysics. – 2022. – Vol. 199. – P. 1–12. URL: <https://doi.org/10.1016/j.jappgeo.2022.104589> (дата обращения 15.10.2023).
17. Sedimentation and environmental dynamics of the Tunka rift valley (Baikal region) in the Late Pleistocene-Holocene based on the analysis of lithological and rock magnetic properties of the deposits from Upper Paleolithic sites / G.G. Matasova, A.Y. Kazansky, A.A. Shchetnikov, I.A. Filinov, N.E. Berdnikova, I.M. Berdnikov // Archaeological Research in Asia. – 2021. – Vol. 26. – P. 1–19. URL: <https://doi.org/10.1016/j.ara.2021.100266> (дата обращения 15.10.2023).

18. Буров Б.В., Ясонов П.Г. Введение в дифференциальный термомагнитный анализ горных пород. – Казань: Изд-во КГУ, 1979. – 159 с.
19. The geologic time scale 2020 / F.M. Gradstein, J.G. Ogg, M.D. Schmitz, G.M. Ogg; ed. by F.M. Gradstein // Elsevier. – 2020. – Vol. 2. – 1390 p.
20. Blytt A. Essay on the immigration of the Norwegian flora during alternating rainy and dry periods. *Nyt Mag. Naturvid.* – Christiana (Oslo), 1876. – 89 p.
21. Blytt A. Forsøg til en teori om indvandringen af Norges flora under vexlende regnfulde og tørre Tider. – *Naturvid: Christiana*, 1876. – Vol. 21. – P. 279–362.
22. Sernander R. Studier öfver den gotländska vegetationens utvecklingshistoria. – Uppsala: Akademisk afhandling, 1894. – 112 p.
23. Рудой А.Н. Гидросферные катастрофы в новейшей истории Земли // Вестник ТГПУ. – 2000. – Выпуск 2 (18). – Серия «Естественные науки» (спецвыпуск). – С. 15–21.
24. A pervasive millennial-scale cycle in north atlantic holocene and glacial climates / G. Bond, W. Showers, M. Cheseby, R. Lotti, P. Almasi, P. Demenocal, P. Priore, H. Cullen, I. Hajdas, G. Bonani // *Science*. – 1997. – Vol. 278. – № 5341. – P. 1257–1266. URL: <https://doi.org/10.1126/science.278.5341.1257> (дата обращения 15.10.2023).
25. Maslennikova A.V., Udachin V.N., Aminov P.G. Lateglacial and Holocene environmental changes in the Southern Urals reflected in palynological, geochemical and diatom records from the lake Syrytkul sediments // *Quaternary International*. – 2016. – Vol. 420. – P. 65–75. URL: <https://doi.org/10.1016/j.quaint.2015.08.062> (дата обращения 15.10.2023).
26. Maslennikova A.V., Udachin V.N. Lakes ecosystem response to Holocene climate changes and human impact in the Southern Urals: diatom and geochemical proxies // *The Holocene*. – 2016. – Vol. 27. – № 6. – P. 847–859. URL: <https://doi.org/10.1177/095968361667594> (дата обращения 15.10.2023).
27. Реконструкция этапов развития озера Тургояк (Южный Урал) в голоцене / А.В. Масленникова, В.Н. Удачин, В.В. Дерягин, М.В. Штенберг // *Литосфера*. – 2018. – Vol. 6. – P. 914–927. URL: <https://doi.org/10.24930/1681-9004-2018-18-6-914-927> (дата обращения 15.10.2023).
28. Масленникова А.В., Удачин В.Н., Дерягин В.В. Палеоэкология и геохимия озерной седиментации голоцена Урал. – Екатеринбург: РИО УрО РАН, 2014. – 136 с.

Информация об авторах

Анастасия Рафаиловна Юсупова, кандидат геолого-минералогических наук, старший научный сотрудник, Институт геологии и нефтегазовых технологий, Казанский федеральный университет, Россия, 420008, г. Казань, ул. Кремлевская, 4/5. <https://orcid.org/0000-0001-8732-3053>; i@ajusupova.ru

Нурия Гавазовна Нургалиева, доктор геолого-минералогических наук, доцент, профессор кафедры геологии нефти и газа имени академика А.А. Трофимука, Институт геологии и нефтегазовых технологий, Казанский федеральный университет, Россия, 420008, г. Казань, ул. Кремлевская, 4/5. <https://orcid.org/0000-0003-4372-9777>; nurgal07@mail.ru

Диляра Мтыгулловна Кузина, кандидат геолого-минералогических наук, старший научный сотрудник, Институт геологии и нефтегазовых технологий, Казанский федеральный университет, Россия, 420008, г. Казань, ул. Кремлевская, 4/5. <https://orcid.org/0000-0003-1626-4636>; di.kuzina@gmail.com

Ольга Сергеевна Чернова, младший научный сотрудник, Институт геологии и нефтегазовых технологий, Казанский федеральный университет, Россия, 420008, г. Казань, ул. Кремлевская, 4/5. OSChernova@kpfu.ru

Вадим Вячеславович Антоненко, младший научный сотрудник, Институт геологии и нефтегазовых технологий, Казанский федеральный университет, Россия, 420008, г. Казань, ул. Кремлевская, 4/5. <https://orcid.org/0000-0002-2311-089X>; ghost.over.the.sea@gmail.com

Поступила в редакцию: 23.10.2023

Поступила после рецензирования: 09.11.2023

Принята к публикации: 09.07.2024

УДК 622.454.23:622.414.2:004.942
DOI: 10.18799/24131830/2024/9/4453
Шифр специальности ВАК: 2.8.6

Проветривание тупиковых очистных камер большого сечения в условиях изменяющегося объема навала руды

Е.В. Накаряков✉, Е.Л. Гришин, Л.Ю. Левин

*Горный институт Уральского отделения Российской академии наук – филиала Пермского федерального
исследовательского центра Уральского отделения Российской академии наук, Россия, г. Пермь*

✉ nakariakov.ev@gmail.com

Аннотация. Актуальность исследования обусловлена необходимостью обеспечения безопасных условий труда в рабочих зонах подземных рудников. В условиях отгрузки руды горными машинами в камерах большого сечения в области за навалом руды возможно образование застойных зон с низкими скоростями воздуха. Ввиду нестационарности процессов накопления и переноса газовых примесей в тупиковой выработке существует вероятность образования локальных скоплений газа в таких застойных зонах, а также их резкого выноса в последующем, что приведет к загрязнению воздушного потока, который попадает на рабочее места машиниста. **Цель:** определение закономерностей выноса газа из тупиковой очистной выработки большого сечения при наличии в ней навала руды. **Объект:** очистная тупиковая горная выработка большого сечения сложной геометрии. **Методы:** трехмерное численное моделирование нестационарного турбулентного течения газовой смеси в программном комплексе Ansys CFX, визуализация и анализ данных моделирования в программном комплексе Wolfram Mathematica. **Результаты.** Представлены результаты математического моделирования проветривания тупиковых очистных камер большого сечения сложной геометрии с учетом изменяющегося объема навала руды при отгрузке погрузочно-доставочными машинами с двигателем внутреннего сгорания. Показано, что в зависимости от высоты навала руды формируется либо единый вихрь, проветривающий пространство камеры, либо застойная зона за навалом руды, которая характеризуется относительно малой интенсивностью переноса массы. Получены зависимости изменения средней концентрации выхлопных газов на выходе из камерного пространства от времени нахождения техники в очистном пространстве. Определен коэффициент эффективности проветривания и зависимость поправочного объемного коэффициента от геометрических параметров очистного пространства. Получена аналитическая модель выноса газов из очистного пространства тупиковой камеры в условиях изменяющегося объема навала руды. Зависимость позволяет определять концентрацию газа на рабочем месте машиниста погрузочно-доставочной машины в любой момент времени, и, как следствие, определять безопасное для машиниста время работы машины по уборке горной массы.

Ключевые слова: тупиковые камеры, камерное пространство, диффузионный перенос, двигатель внутреннего сгорания, выхлопные газы

Благодарности: Исследование выполнено при финансовой поддержке Минобрнауки РФ в рамках государственного задания (проект № 122012000396-6).

Для цитирования: Накаряков Е.В., Гришин Е.Л., Левин Л.Ю. Проветривание тупиковых очистных камер большого сечения в условиях изменяющегося объема навала руды // Известия Томского политехнического университета. Инжиниринг георесурсов. – 2024. – Т. 335. – № 9. – С. 51–60. DOI: 10.18799/24131830/2024/9/4453

UDC 622.454.23:622.414.2:004.942
DOI: 10.18799/24131830/2024/9/4453

Ventilation of large section blind headings under conditions of changing ore load size

E.V. Nakariakov✉, E.L. Grishin, L.Yu. Levin

Mining Institute of the Ural Branch of the Russian Academy of Sciences, Perm, Russian Federation

✉ nakariakov.ev@gmail.com

Abstract. Relevance. The need to ensure safe working conditions in the working areas of underground mines. Stagnant zones with low air velocities can be formed in large section blind heading behind the ore bulk when ore is shipped by mining machines. There is a possibility of the formation of local gas accumulations and their abrupt removal later in such stagnant zones due to the unsteadiness of accumulation and transfer of gas impurities in a blind heading. A sharp removal of gas will lead to contamination of the load-haul-dump operators' workplace. **Aim.** To identify removal of exhaust gases in large section blind headings in conditions of changing ore load size. **Objects.** Large section blind headings with of complex geometry. **Methods.** Three-dimensional numerical simulation of unsteady turbulent flow of a gas-air mixture in the Ansys CFX, visualization and analysis of simulation data in the Wolfram Mathematica. **Results.** The paper presents the results of mathematical modeling of ventilation of large section blind headings of complex geometry under conditions of changing ore load size formed during mining operations by the load-haul-dump machines with an internal combustion engine. It is shown that either a single vortex is formed that ventilates the blind headings space, or a stagnant zone behind the bulk ore, which is characterized by a relatively low intensity of mass transfer. Vortex formation depends on the height of the ore bulk. The authors have obtained the dependences of the change in the average concentration of exhaust gases at the outlet of the blind headings space on the operating time of the machine. They determined the dependence of the correction volume coefficient on the geometric parameters of the blind headings. An analytical model of the removal of gases from the blind headings space under conditions of changing bulk ore volume is obtained. The expression of increment in gas concentration on an operator's workplace makes it possible to derive formula to find maximum time of load-haul dump operation in a stope such that gas concentration is never higher than maximum allowable concentration.

Keywords: large section blind heading, blind heading space, diffusion transfer, combustion engine, exhaust gases

Acknowledgements: The research was financially supported by the Ministry of Education of the Russian Federation within the state assignment (project no. 122012000396-6).

For citation: Nakariakov E.V., Grishin E.L., Levin L.Yu. Ventilation of large section blind headings under conditions of changing ore load size. *Bulletin of the Tomsk Polytechnic University. Geo Assets Engineering*, 2024, vol. 335, no. 9, pp. 51–60. DOI: 10.18799/24131830/2024/9/4453

Введение

При отработке краевых запасов рудных месторождений зачастую применяется камерная система разработки. С целью снижения количества проводимых выработок используются тупиковые камеры. Подразумевается проходка нарезной выработки и дальнейшее ее расширение до размеров камеры обратным порядком путем разбуривания веером скважин в кровлю выработки (рис. 1).

Уборка горной массы осуществляется погрузочно-доставочными машинами. Вследствие отсутствия крепления камерного пространства ма-

шинист производит управление техникой с использованием пульта дистанционного управления, находясь при этом в нарезной выработке. Тупиковые камеры классически проветриваются нагнетательным способом. Конец вентиляционного трубопровода доводится до устья камерного пространства. Таким образом, рабочее место машиниста погрузочно-доставочной машины находится на исходящей струе, загрязненной вредными компонентами выхлопных газов двигателя внутреннего сгорания.

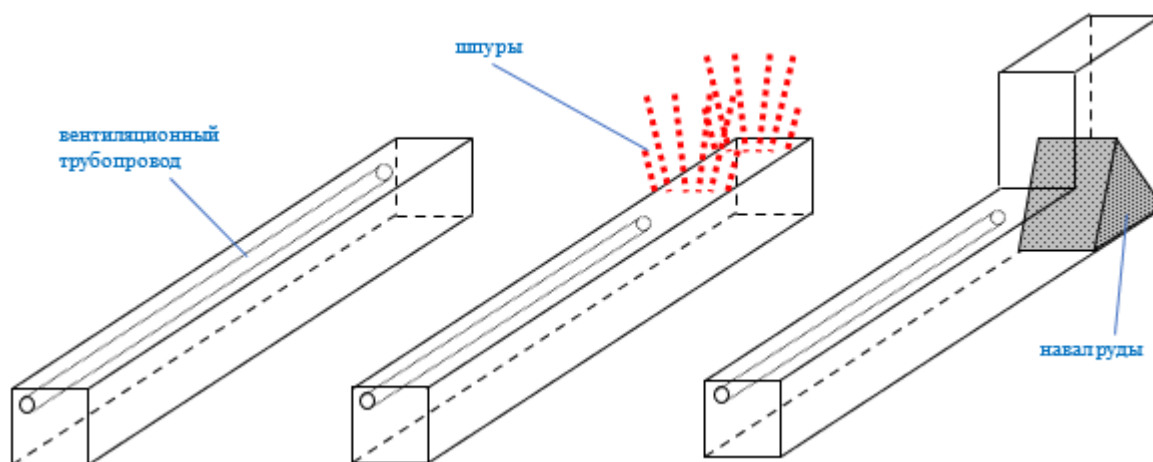


Рис. 1. Стадийность ведения горных работ в тупиковых камерах

Fig 1. Procedure for mining operations in a large section dead-end mine

Вследствие взрыва в камерном пространстве образуется навал руды, который может разделять проветриваемый объем камеры на два с точки зрения проветривания. Первый – активно проветривающийся объем до навала руды за счет кинетической энергии воздушной струи, бьющей из конца вентиляционного трубопровода. Второй – объем за навалом руды, проветривающийся преимущественно за счет турбулентной диффузии и локальных конвективных вихрей, формирующихся в застойных зонах воздушного пространства камеры.

С учетом возможности образования застойных зон в области за навалом руды существует риск накопления газов. А ввиду нестационарности процессов накопления и переноса газовых примесей в тупике существует вероятность резкого выноса отдельных локальных скоплений газа из застойной зоны в область основного потока и далее к рабочему месту машиниста в процессе уборки. Таким образом, исследования различного рода преград на вынос газов из камер сложной геометрии являются важной задачей обеспечения безопасности работ.

Исследованиями в области проветривания выработок большого сечения занимались И.И. Медведев и А.Е. Красноштейн [1]. Показано принципиальное различие в процессах проветривания камер и выработок малого сечения. Малые скорости движения воздуха в выработках большого сечения уменьшают значение конвективной составляющей переноса, а с увеличением масштаба турбулентных вихрей повышается значение турбулентной диффузии. Наличие больших масс свежего воздуха в камере и небольшие скорости его движения создают условия, при которых градиент концентрации сохраняется более длительное время и обеспечивается диффузный перенос вещества.

Исследованиями проветривания очистных камер занимался коллектив авторов во главе с К.Ю. Лайгна и [2–4]. Ими изучены закономерности формирования круглых и плоских струй в камерах с различными геометрическими параметрами. По экспериментальным данным найдены коэффициенты продольной и поперечной турбулентной диффузии круглых и плоских струй при различных коэффициентах стеснения. Предложена модель, описывающая перенос пассивной примеси [2, 3]. Предложенная модель не соответствует ситуациям работы в камерах дизельных двигателей ввиду повышенной температуры выхлопных газов. Это в свою очередь приводит к вертикальной стратификации и конвективной циркуляции воздушного потока. Решением этой проблемы может быть использование уравнения продольной дисперсии с коэффициентом эффективной турбулентной диффузии стратифицированного потока [4].

Аэрогазодинамика очистных камер большого сечения очень близка к таковой для случая тоннелей.

Так, научные сотрудники Тульского Государственного Университета оценивали [5] вклад нестационарной конвективно-турбулентной диффузии в содержание радона в атмосфере тоннеля, что в свою очередь позволило уточнить существующие закономерности газообмена горного массива с атмосферой тоннелей, а также усовершенствовать методику расчета количества воздуха и прогноза газовых ситуаций.

В зарубежных работах [6–12] проведены исследования проветривания тоннелей на стадии проходки. В работе [6] на основании численного моделирования показано, что комбинирование нагнетательного и всасывающего способа проветривания снижает образование первичного вихря в забойной части, что улучшает отвод вредных газов и значительно сокращает время проветривания. В работе [7] изучено влияние таких факторов, как: положение воздуховода, расстояние между концом воздуховода и забоем, скорость воздуха в воздуховоде и площадь поперечного сечения тоннеля, на величины зон активной струи воздуха, обратного потока и вихря в призабойном пространстве. Полученные результаты показали, что зону вблизи забоя можно разделить на зону струи, зону обратного потока и зону вихря. В работе [8] применено численное моделирование для определения влияния подвешивания вентиляционного трубопровода на динамику выноса взрывных газов при проходке тоннелей. Результаты исследований показали, что чем выше скорость воздуха в воздуховоде и чем меньше расстояние между воздуховодом и забоем, а также чем выше высота подвешивания воздуховода, тем быстрее газы выносятся из тоннеля. Чем больше расстояние между воздуховодом и боковой стенкой, тем больше вихрей возникает в тупиковом тоннеле и тем дольше газ выносятся из тоннеля. В работе [9] исследовано поведение воздушного потока и рассеивание газа во время строительства двойного туннеля. В работе [10] изучены характеристики вентиляционного потока в сверхбольших подземных туннелях и сделан вывод, что минимальная скорость воздуха должна быть больше 0,15 м/с, чтобы снизить концентрацию оксида азота ниже предельно-допустимого значения в течение 20 минут. Авторами работы [11] на основании вычислительной гидрогазодинамики получена аналитическая модель, описывающая максимальное эффективное расстояние проветривания забоя тоннеля. Получены эмпирические коэффициенты, используемые в модели. В работе [12] проведены исследования влияния утечек в вентиляционном трубопроводе на распределение концентраций газов от взрывных работ. Показано, что утечка воздуха снижает пик распределения загрязняющих веществ и ускоряет выброс вредных газов, однако этот эффект уменьшается по мере удаления от устья трубопровода.

В работе [13] проведены исследования максимальной длины проветривания тупиковой выработки за счет турбулентной диффузии. На основе численного моделирования было показано, что для выработки длиной 20 м, шириной 6,6 м и высотой 3 м максимальная длина проветривания тупиковой горной выработки составляет 12 м. Такая величина достигалась при скорости воздуха в сквозной выработке 1,35 м/с. Результаты исследования согласуются с данными эксперимента, проведенного в [14].

Коллектив Горного института УрО РАН в [15–17] проводил исследования условий проветривания тупиковых выработок, в том числе и большого сечения, с использованием математического моделирования. В работе [15] на основании аналитического моделирования определены эффективные условия использования источников тяги для проветривания выработок большого сечения. В работах [16, 17] с использованием математического моделирования показано, что процесс проветривания тупиковой выработки происходит медленнее, чем это описывает модель идеального смешения, ввиду присутствия в структуре воздушных потоков отдельных вихрей и застойных зон с пониженным массообменом с другими потоками.

Указанные исследования рассматривают процесс проветривания как тупиковых выработок, так и тупиковых очистных камер, однако детальных исследований проветривания камер сложной геометрии (в условиях изменяющегося навала руды) в существующей литературе нет. В связи с вынужденным нахождением машиниста погрузочно-доставочной машины в процессе отгрузки руды на исходящей загрязненной струе воздуха исследование безопасности ведения работ с точки зрения проветривания является актуальной проблемой добычи полезных ископаемых в камерах сложной геометрии. Экспериментальные исследования проветривания тупиковых камерообразных горных выработок сопряжены с рядом трудностей, главная из которых – невозможность нахождения человека в очистном пространстве в момент замеров. Наиболее доступным способом изучения процесса проветривания тупиковых выработок большого сечения является математическое моделирование.

Численное моделирование

Для моделирования процесса накопления и выноса вредных компонентов из камерного пространства, образующихся при работе машин с двигателем внутреннего сгорания, использовано численное моделирование. В частности, использован программный комплекс ANSYS. Задача решается методом осреднения по Рейнольдсу уравнения Навье–Стокса (RANS). Для учета режима развитой турбулентности протекания воздуха в горных выработ-

ках используется стандартная k-ε модель. Выбор модели турбулентности обусловлен ранее проведенными исследованиями. В работе [18] рассмотрена задача проветривания тупиковой очистной камеры, использованы различные модели турбулентности и доказано, что стандартная k-ε модель турбулентности позволяет рассчитать многие турбулентные течения с приемлемой для задач рудничной вентиляции точностью и дает достаточно хорошую сходимость результатов. Интенсивность турбулентности при этом на входе в расчетную область составляет 2 %, масштаб вихрей – 20 см.

В качестве геометрии исследуемой области выбрана обобщенная очистная тупиковая камера, геометрические параметры которой соответствуют параметрам очистных тупиковых горных выработок подземных рудников Талнахского рудного узла (РФ, Красноярский край):

- площадь сечения нарезной выработки, соответствует минимально возможной для проезда шахтного автосамосвала и навешивания вентиляционного трубопровода – 36 м²;
- максимальная высота камерного пространства, соответствует высоте подэтажа – 15 м;
- ширина камерного пространства, соответствует ширине ленты – 8 м;
- длина камерного пространства – 30 м;
- диаметр вентиляционного трубопровода – 1 м.

Исследуемая геометрия построена с учетом постепенной уборки горной массы вследствие ведения взрывных работ. Смещение навала руды происходит к концу камерного пространства вследствие постепенной уборки руды погрузочно-доставочной машиной (рис. 2). Навал руды геометрически представляет собой треугольную призму, т. к. взрывные работы осуществляются в кровлю нарезной выработки, образуя камерное пространство. Высота навала изменяется от 14 до 0 м с шагом в 1 м. Дополнительно в диапазоне между величиной навала руды 12 и 14 м исследовано изменение высоты с шагом 0,25 м.

Моделирование осуществлено для трех случаев, отличающихся скоростями газовой среды. На выходе из вентиляционного става задается скорость воздуха, соответствующая подаче:

- 17,25 кг/с воздуха в первом случае;
- 23 кг/с воздуха во втором случае;
- 28,75 кг/с воздуха в третьем случае.

Источник газовой выделения представлен сферой диаметром 1 м с целью упрощения расчета. В качестве газа выбран оксид углерода (CO). Скорость движения газовой смеси соответствует выделению 0,23 кг/с газа. Концентрация газа при этом соответствует 75, 100 и 125 предельно-допустимым концентрациям (в первом, втором и третьем случаях соответственно).

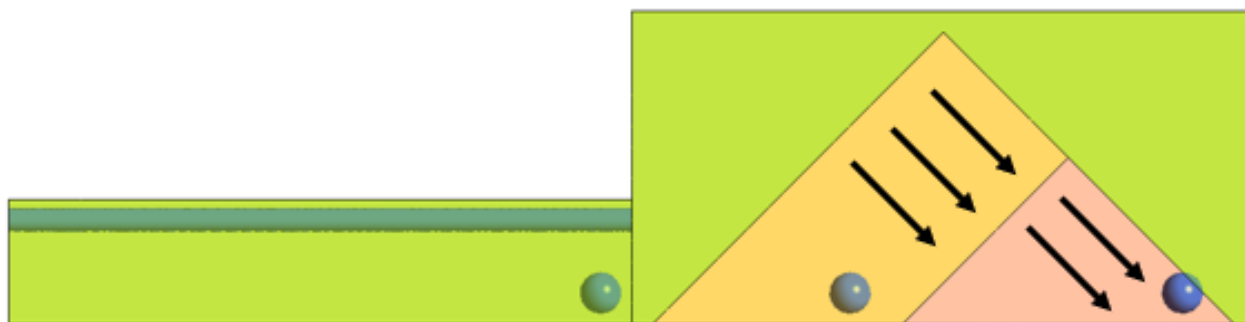


Рис. 2. Смещение навала руды в исследуемой геометрии
Fig. 2. Ore pile displacement in the research geometry

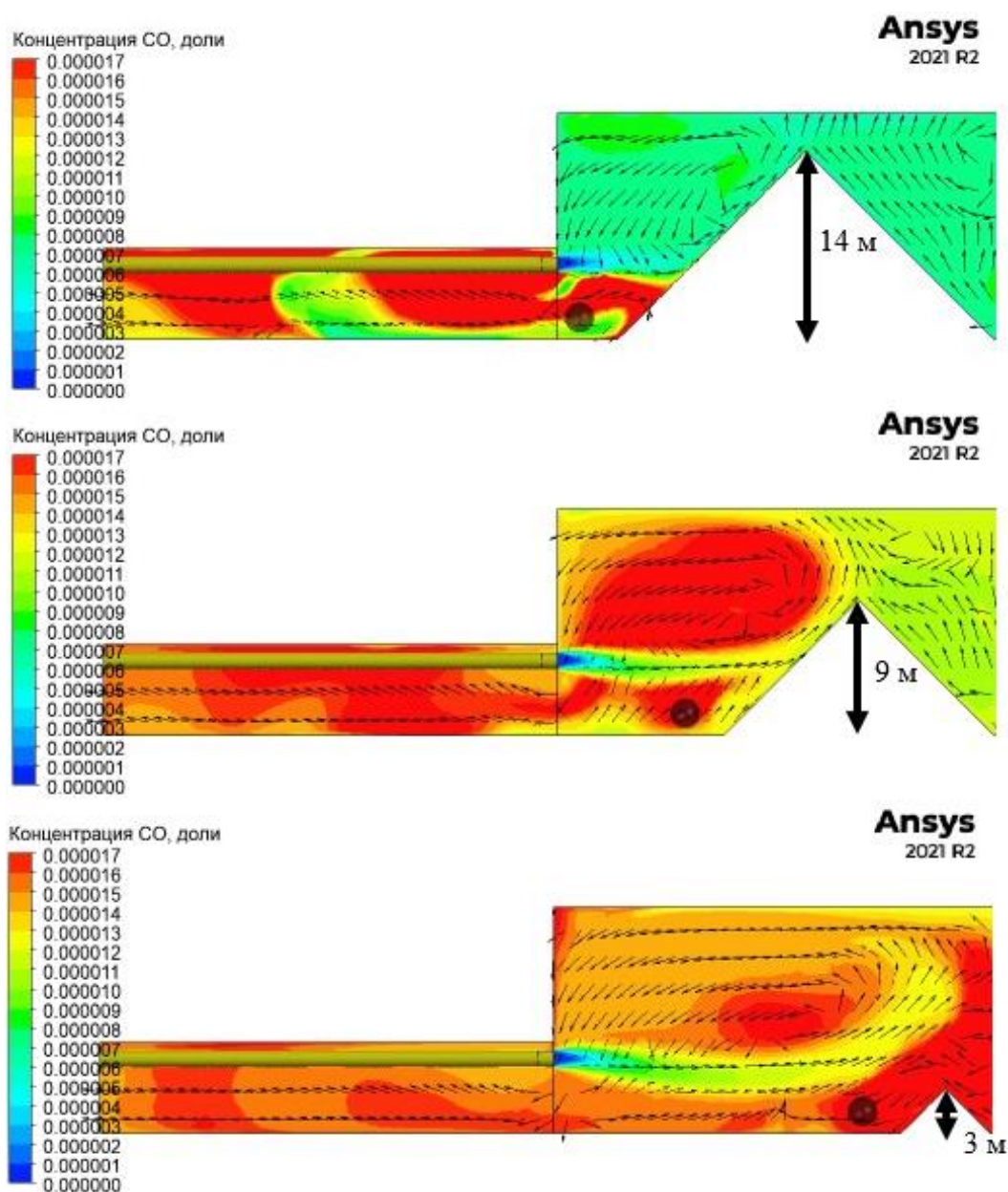


Рис. 3. Распределение концентраций газа в продольном разрезе по оси трубопровода для камеры сложной геометрии с навалом руды высотой 14, 9 и 3 м
Fig. 3. Distribution of gas concentrations in longitudinal section along the pipeline axis for complex geometry chamber with ore pile of 14, 9 and 3 m high

Массовый расход и концентрация выхлопных газов подобраны таким образом, чтобы подаваемого расхода воздуха было достаточно для разжижения до предельно-допустимой концентрации.

Результаты моделирования

Моделирование осуществляется в нестационарной постановке. Время работы техники с двигателем внутреннего сгорания в очистном пространстве камеры составляет 600 с. На рис. 3 показан продольный разрез исследуемой геометрии по оси трубопровода в конечный момент времени.

На рисунке видно, что если при малых высотах навала руды в выработке формируется единый вихрь, проветривающий всё ее пространство, то при достаточно больших навалах руды (9 м и более) ситуация изменяется – за навалом формируется застойная зона, в которой могут существовать один или несколько вихрей с относительно малой интенсивностью переноса массы. Наибольшие концентрации газа наблюдаются в камерном пространстве до навала руды и выносятся в разрезную выработку, где расположено рабочее место машиниста. Но при этом циркулирующий в основном вихре газ, выделяющийся из источника, может попадать в застойную область за навалом руды и находиться там продолжительное время.

С целью оценки величины концентраций на рабочем месте машиниста построены графики изменения средней по сечению концентрации вредных компонентов выхлопных газов на выходе из раз-

резной выработки для различных высот навала руды. На рис. 4 представлены графики изменения концентраций.

Кривые на рисунке имеют колебательный характер ввиду нестационарности вихрей в разрезной выработке, однако если усреднить высокочастотные колебания концентрации газа, то можно получить основной экспоненциальный тренд изменения концентрации газа при проветривании тупиковых выработок. Это согласуется с работой [19], где показано, что концентрации газа возрастают и снижаются по экспоненциальному закону.

С целью определения закономерностей возрастания концентраций газа в условиях изменяющегося объема навала руды полученные графики изменения концентрации вредных компонентов выхлопных газов обработаны на предмет исключения кратковременных колебаний малой амплитуды и далее аппроксимированы в программном комплексе Wolfram Mathematica. Зависимость возрастания концентрации газа от времени в тупиковой горной выработке имеет экспоненциальный характер [19]:

$$C(t) = C_{\max} - C_{\max} \cdot e^{-\frac{k_T Q}{V} t}, \quad (1)$$

где $C(t)$ – зависимость изменения концентрации газа от времени t ; $C_{\max}$ – максимально возможная концентрация газа; k_T – коэффициент турбулентной диффузии струи; Q – объемный расход воздуха, подаваемого на проветривание, м³/с; V – проветриваемый объем тупиковой выработки, м³.

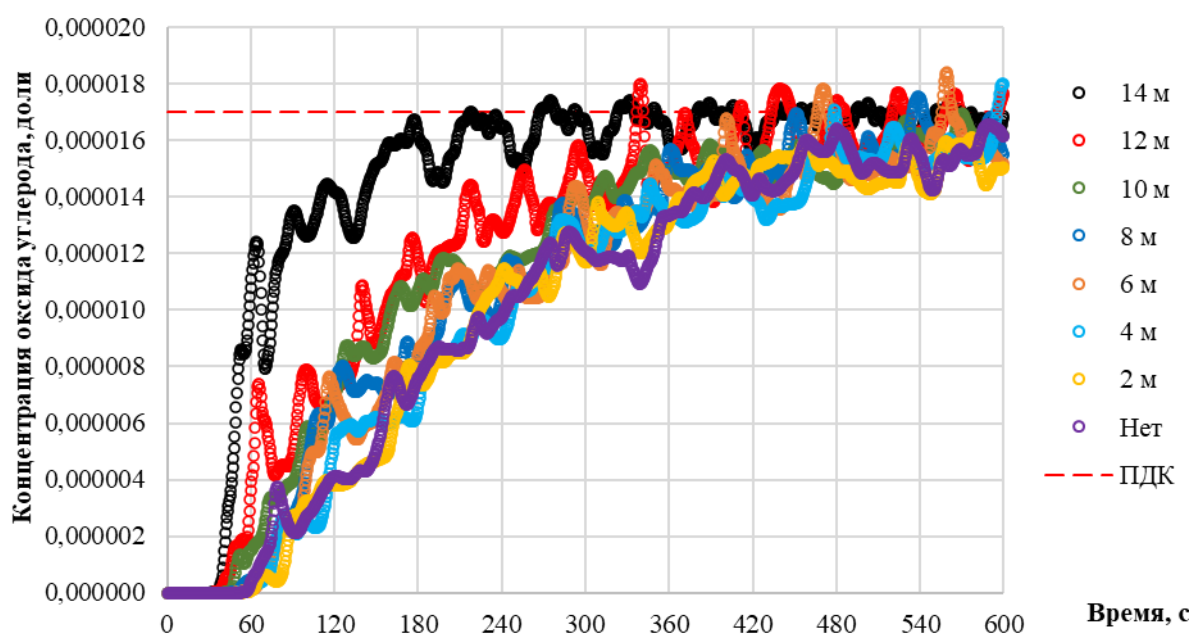


Рис. 4. Графики изменения концентрации вредных компонентов выхлопных газов на выходе из разрезной выработки для различных высот навала руды от времени работы техники в очистном пространстве

Fig. 4. Graphs of the change in the concentration of harmful exhaust gas components at the outlet of the split mine for different ore pile heights from the time of operation of the equipment in the treatment space

Максимально возможная концентрация газа определяется согласно закону сохранения масс с использованием параметров газовыделения техники с двигателем внутреннего сгорания [20]:

$$C_{\max} = \frac{g_{ex} \cdot C_{ex}}{k_T \cdot Q}, \quad (2)$$

где g_{ex} – объемный расход выхлопных газов машины, м³/с; C_{ex} – концентрация вредных компонентов в выхлопных газах машины.

Модель, описанная уравнением (1), включает понятие «коэффициент турбулентной диффузии струи», которое не совпадает с общепринятым термином коэффициента турбулентной диффузии в гидрогазодинамике. В настоящей работе данный коэффициент назван «коэффициентом эффективности проветривания». В исследованиях [21, 22] коэффициент эффективности проветривания неоднократно определен и находится вблизи единицы.

В настоящем исследовании, как и в [21, 22], зависимости концентрации газа на выходе из разрезной выработки аппроксимированы с использованием следующей функции:

$$C(t) = \frac{g_{ex} \cdot C_{ex}}{k_T \cdot Q} - \left(\frac{g_{ex} \cdot C_{ex}}{k_T \cdot Q} - C_0 \right) \cdot e^{-\frac{k_T \cdot Q}{k_V \cdot V} t}, \quad (3)$$

где g_{ex} , C_{ex} , C_0 , Q , V – известные параметры; k_T , k_V – коэффициент эффективности проветривания и поправочный объемный коэффициент (искомые параметры аппроксимации).

Функция (3) получена путем объединения классической зависимости возрастания газа по Вороницу (1) и результатов исследований В.П. Пьяникова [20] в области максимально возможного значения концентрации газа в тупиковой выработке при работе погрузочно-доставочной машины, описанного выражением (2).

Результаты аппроксимации представлены в табл. 1.

По результатам аппроксимации полученных значений средней концентрации газа на выходе из разрезной выработки для различных высот навала руды значение коэффициента турбулентной диффузии свободной струи воздуха для условий протяженной тупиковой очистной камеры рудников Талнахского рудного узла равно единице (при условии подачи требуемого количества воздуха в рабочую зону). С учетом этого произведена аппроксимация полученных зависимостей по следующей функции:

$$C(t) = \frac{g_{ex} \cdot C_{ex}}{Q} - \left(\frac{g_{ex} \cdot C_{ex}}{Q} - C_0 \right) \cdot e^{-\frac{Q}{k_V \cdot V} t}. \quad (4)$$

Функция (4) получена из функции (3) путем приравнивания коэффициента эффективности проветривания к единице. На рис. 5 представлен график зависимости поправочного объемного коэффициента от отношения высоты навала к общей высоте камеры.

Таблица 1. Результаты определения искомых параметров аппроксимации для первого случая (подача 23 кг/с воздуха)

Table 1. Results of determination of the required approximation parameters for the first case (23 kg/s air supply)

Параметры аппроксимации Approximation parameters	k_T	k_V	R^2
Высота навала, м Height of ore, m			
Без навала Height of ore=0	0,9631	1,1300	0,9968
1	0,9619	1,1009	0,9968
2	1,0114	1,0186	0,9965
3	1,0051	0,9827	0,9961
4	1,0029	1,0070	0,9969
5	1,0132	0,9354	0,9935
6	1,0421	0,8773	0,9950
7	1,0425	0,9011	0,9943
8	1,0417	0,8737	0,9962
9	1,0434	0,8437	0,9975
10	1,0561	0,8444	0,9979
11	1,0294	0,8221	0,9948
12	1,0244	0,7939	0,9955
12,25	1,0428	0,644	0,9784
12,5	1,0319	0,4964	0,9810
12,75	1,0518	0,3593	0,9751
13	1,0409	0,2443	0,9795
13,25	1,0707	0,2738	0,9892
13,5	1,0430	0,2260	0,9809
13,75	1,0412	0,2390	0,9817
14	1,1661	0,0054	0,9689

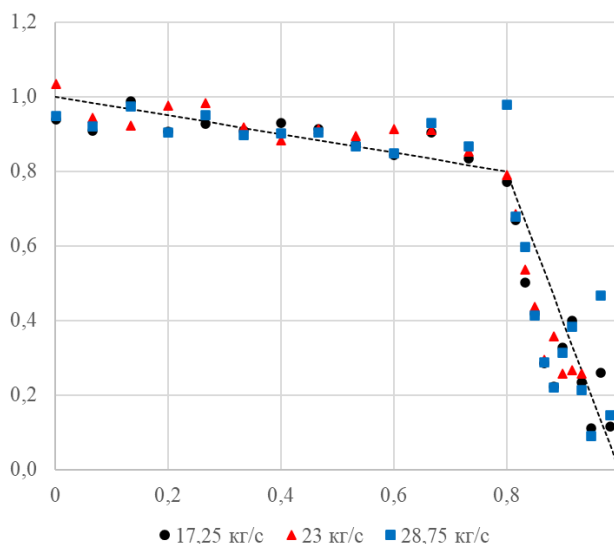


Рис. 5. Зависимость поправочного объемного коэффициента (ордината) от отношения высоты навала к общей высоте камеры (абсцисса)

Fig. 5. Dependence of the volumetric correction factor (ordinate) on the ratio of the pile height to the total chamber height (abscissa)

По результатам аппроксимации полученных значений средней концентрации газа на выходе из разрезной выработки для различных высот навала

руды и различных массовых расходов воздуха из вентиляционного трубопровода значение поправочного объемного коэффициента лежит в пределах от 0,1 до 1. Как видно из рис. 5, при соотношении высоты навала к общей высоте камеры от 0 до 0,8 значение поправочного объемного коэффициента находится в пределах 0,8...1. При соотношении выше 0,8 значение поправочного объемного коэффициента резко снижается. Это связано с уменьшением фактического объема проветривания ввиду условного разделения камерного пространства на два принципиально различных с точки зрения проветривания объема (рис. 3).

Как видно из рис. 5, вид зависимости поправочного объемного коэффициента от соотношения высоты навала руды к общей высоте камерного пространства – кусочно-непрерывная, с точкой смены при относительной высоте навала 0,8. Полученные на графике, представленном на рис. 5, значения аппроксимированы. Определенная зависимость следующая:

$$k_V = \begin{cases} -0,25 \frac{H_n}{H_k} + 1, & \frac{H_n}{H_k} \leq 0,8 \\ -4 \frac{H_n}{H_k} + 4, & \frac{H_n}{H_k} > 0,8 \end{cases} \quad (5)$$

где H_n – высота навала руды, м; H_k – высота очистного пространства камеры, м.

Необходимо отметить, что относительная высота навала свыше 0,8 на практике имеет достаточно короткий жизненный цикл. Объем навала руды в пределах относительной высоты 0,8...1 составляет 36 % от общего объема руды. Более того, технологический процесс выстроен так, чтобы уборка горной массы производилась в течение одной смены. Таким образом, две трети времени работы по отгрузке руды относительная высота навала лежит в пределах 0...0,8. Поэтому практическую значимость имеет только первая часть зависимости (5).

С учетом первой части полученной зависимости (5) при $\frac{H_n}{H_k} \leq 0,8$ аналитическая модель выноса газов из очистного пространства тупиковой камеры принимает вид:

$$C(t) = \frac{g_{ex} \cdot C_{ex}}{q} - \left(\frac{g_{ex} \cdot C_{ex}}{q} - C_0 \right) \cdot e^{\frac{q}{(-0,25 \frac{H_n}{H_k} + 1) \cdot V} \cdot t} \quad (6)$$

Полученная зависимость возрастания концентрации газа на рабочем месте горнорабочего позволяет перейти к вычислению максимального времени нахождения техники в пространстве очистной камеры, не превышая предельно-допустимых значений концентрации газа согласно правилам безопасности. Однако следует учесть тот факт, что полученная зависимость описывает среднюю концентрацию. При анализе данных, представленных на рис. 4, можно заметить, что реальные показатели концентрации могут существенно отличаться от

среднего значения (как в меньшую, так и в большую сторону). Произведена оценка относительного отклонения осциллирующих концентраций, полученных по результатам численного моделирования, от усредненной кривой временной динамики концентраций газа согласно аналитической модели (6). Оценка отклонений произведена только для значений, превышающих предельно-допустимую концентрацию. Результаты представлены в табл. 2.

Таблица 2. Максимальное относительное отклонение осциллирующих концентраций, полученных по результатам численного моделирования, от усредненной кривой временной динамики концентраций газа согласно аналитической модели

Table 2. Maximum relative deviation of the oscillating concentrations obtained from the results of numerical simulation from the averaged curve of the time dynamics of gas concentrations according to the analytical model

Величина навала руды, м Height of ore, m	0	2	4	6	8	10	12	14
Максимальное относительное отклонение, % Maximum relative deviation, %	0	0	13	14	9	0	17	3

Для учета колебательного эффекта динамики концентраций при вычислении максимального времени нахождения техники в пространстве очистной камеры необходимо концентрацию, полученную по модели (6) (6), скорректировать на коэффициент неравномерности выноса газа, вызванный пространственной неоднородностью распределения векторного поля скорости и концентрации газа в очистном пространстве камеры. Его значение, исходя из анализа табл. 2, с учетом максимально возможного 17%-го превышения в простейшем случае может быть принято равным 1,17.

Заключение

В работе проведена серия численных расчетов проветривания тупиковой очистной выработки. Полученные численные зависимости изменения средней концентрации выхлопных газов на выходе из разрезной выработки от времени позволили определить коэффициент эффективности проветривания, используемый в аналитической модели, – он может быть принят равным единице.

Получена зависимость поправочного объемного коэффициента от соотношения высоты навала руды к общей высоте камерного пространства. Она кусочно-непрерывная, с точкой смены при относительной высоте навала 0,8. Каждая из частей носит линейный характер.

Аналитическая модель скорректирована на по- тношения высоты навала руды к общей высоте ка-
правочный объемный коэффициент, зависящий от мерного пространства.

СПИСОК ЛИТЕРАТУРЫ

1. Медведев И.И., Красноштейн А.Е. Аэрология калийных рудников. – Свердловск: УрО АН СССР, 1990. – 251 с.
2. Лайгна К.Ю. Математическое моделирование диффузионных процессов вентиляции штреко- и камерообразных выработок. – Таллин: НИИ СВЦ, 1979. – Т. 1. – 231 с.
3. Лайгна К.Ю., Блюм М.Ф., Виерлайд А.Х. Турбулентная диффузия в стратифицированных потоках подземных выработок // ФТПРПИ. – 1988. – № 1. – С. 96–98.
4. Лайгна К.Ю., Поттер Э.А. Турбулентное струйное течение воздуха в сквозных выработках // ФТПРПИ. – 1989. – № 3. – С. 91–101.
5. Аэрогазодинамические закономерности проветривания строящихся тоннелей / А.Н. Качурин, О.А. Афанасьев, Г.Л. Апете, В.П. Стась // Известия Тульского государственного университета. Науки о Земле. – 2020. – № 3. – С. 230–243.
6. Comparison of ventilation methods used during tunnel construction / X. Chang, J. Chai, Z. Xu, Y. Qin // Engineering Applications of Computational Fluid Mechanics. – 2019. – Vol. 14. – № 1. – P. 107–121.
7. Tunnel ventilation during construction and diffusion of hazardous gases studied by numerical simulations / X. Chang, J. Chai, J. Luo, Y. Qin, Z. Xu, J. Cao // Building and Environment. – 2020. – Vol. 177. – P. 106902.
8. Diffusion characteristics of airflow and CO in the dead-end tunnel with different ventilation parameters after tunneling blasting / J. Wang, Y. Xue, J. Xiao, D. Shi // ACS Omega 2023. – 2023. – Vol. 8. – № 39. – P. 36269–36283.
9. Air flow behavior and gas dispersion in the recirculation ventilation system of a twin-tunnel construction / Y. Fang, J. Fan, B. Kenneally, M. Mooney // Tunnelling and Underground Space Technology. – 2016. – Vol. 58. – P. 30–39.
10. Li M., Aminossadati S.M., Wu C. Numerical simulation of air ventilation in super-large underground developments // Tunnelling and Underground Space Technology. – 2016. – Vol. 52. – P. 38–43.
11. A discussion on the effective ventilation distance in dead-end tunnels / M. Garcia-Diaz, C. Sierra, C. Miguel-Gonzalez, B. Pereiras // Energies. – 2019. – Vol. 12. URL: <https://www.mdpi.com/1996-1073/12/17/3352> (дата обращения 16.10.2023).
12. Numerical simulation of tunnel ventilation considering air leakage mechanism of air duct / X. Chang, C. Jaturapitakkul, J. Ren, R. Yang. URL: <https://doi.org/10.21203/rs.3.rs-3247155/v1> (дата обращения 16.10.2023)
13. Feroze T. An initial investigation of room and pillar ventilation using CFD // 24th international mining congress and exhibition of turkey. – Antalya, Turkey, 2015. – P. 1–8.
14. Meyer C.F. The effect of last through road air velocities on unventilated headings: Project no. CC8E10. – Republic of South Africa: Chamber of Mines Research Organisation (COMRO), 1989. – 15 p.
15. Казаков Б.П., Шалимов А.В., Левин Л.Ю. Проветривание выработок большого сечения с помощью вентиляторных установок, работающих без перемычки // Известия ТулГУ. Науки о земле. – 2010. – № 2. – С. 89–97.
16. Файнбург Г.З., Семин М.А., Исаевич А.Г. Взаимосвязь физических механизмов, математических моделей и технических способов проветривания тупиковых горных выработок // Горное эхо. – 2020. – Т. 80. – № 3. – С. 131–137.
17. Файнбург Г.З., Исаевич А.Г. Анализ микроциркуляционных потоков между микрозонами в забое тупиковых комбайновых выработок калийных рудников при различных способах проветривания // Горный информационно-аналитический бюллетень. – 2020. – № 3. – С. 58–73.
18. Kolesov E.V., Nakaryakov E.V. Selection of turbulence model in ventilation modeling for blind stopes // IOP Conference Series: Earth and Environmental Science. – 2021. – Vol. 773. – № 1. – P. 012071.
19. Воронин В.Н. Основы рудничной аэро-газодинамики. – М.; Л.: Углетехиздат, 1951. – 492 с.
20. Пьянников В.П. Повышение эффективности проветривания тупиковых горных выработок при работе погрузочно-доставочных (транспортных) машин с двигателями внутреннего сгорания: дис. ... канд. техн. наук. – Екатеринбург, 2005. – 198 с.
21. Анализ закономерностей накопления и выноса выхлопных газов от машин с двигателем внутреннего сгорания в тупиковых камерообразных горных выработках / Е.В. Накаряков, М.А. Семин, Е.Л. Гришин, Е.В. Колесов // Безопасность труда в промышленности. – 2021. – № 5. – С. 41–47.
22. Nakaryakov E.V., Grishin E.L. Ventilation in long blind stopes during operation of load-haul-dumpers with combustion engines // IOP Conference Series: Earth and Environmental Science. – 2021. – Vol. 773. – № 1. – P. 012077.

Информация об авторах

Евгений Вадимович Накаряков, инженер отдела аэрологии и теплофизики Горного института Уральского отделения Российской академии наук – филиала Пермского федерального исследовательского центра Уральского отделения Российской академии наук, Россия, 614007, г. Пермь, ул. Сибирская, 78А. nakariakov.ev@gmail.com, <https://orcid.org/0009-0005-8950-3951>

Евгений Леонидович Гришин, кандидат технических наук, заведующий сектором аэрологической безопасности Горного института Уральского отделения Российской академии наук – филиала Пермского федерального исследовательского центра Уральского отделения Российской академии наук, Россия, 614007, г. Пермь, ул. Сибирская, 78А. aerovevg@mail.ru, <https://orcid.org/0000-0002-1091-3976>

Лев Юрьевич Левин, доктор технических наук, профессор, член-корреспондент РАН, заведующий отделом аэрологии и теплофизики Горного института Уральского отделения Российской академии наук – филиала Пермского федерального исследовательского центра Уральского отделения Российской академии наук, Россия, 614007, г. Пермь, ул. Сибирская, 78А. aerolog_lev@mail.ru, <https://orcid.org/0000-0003-0767-9207>

Поступила в редакцию: 27.10.2023

Поступила после рецензирования: 21.11.2023

Принята к публикации: 03.09.2024

REFERENCES

1. Medvedev I.I., Krasnoshtein A.E. *Aerology of potash mines*. Sverdlovsk, UrO AN SSSR Publ., 1990. 251 p. (In Russ.)
2. Laygna K.Yu. *Mathematic modelling of diffusion processes of drift- and stope mines ventilation*. Tallin, NII SVC Publ., 1979. Vol. 1, 231 p. (In Russ.)
3. Laygna K.Yu., Blum M.F., Viirlayd A.Kh. Turbulent diffusion in stratified flows of underground mines. *Journal of Mining Science*, 1988, no 1, pp. 96–98. (In Russ.)
4. Laygna K.Yu., Potter E.A. Turbulent jet flow of air in through mines. *Journal of Mining Science*, 1989, no. 3, pp. 91–101. (In Russ.)
5. Kachurin A.N., Afanasiev O.A., Apete G.L., Stas V.P. Aerogas dynamic regulations ventilation of constraction tunnels. *Izvestiya of the Tula state University. earth science*, 2020, no. 3, pp. 230–243. (In Russ.)
6. Chang X., Chai J., Xu Z., Qin Y. Comparison of ventilation methods used during tunnel construction. *Eng Appl Comput*, 2019, vol. 14, pp. 107–121.
7. Chang X., Chai J., Luo J., Qin Y., Xu Z., Cao J. Tunnel ventilation during construction and diffusion of hazardous gases studied by numerical simulations. *Building and Environment*, 2020, vol. 177, art. no. 106902. DOI: 10.1016/j.buildenv.2020.106902
8. Wang J., Xue Y., Xiao J., Shi D. Diffusion characteristics of airflow and CO in the dead-end tunnel with different ventilation parameters after tunneling blasting. *ACS Omega*, 2023, vol. 39, pp. 36269–36283. DOI: 10.1021/acsomega.3c04819
9. Fang Y., Fan J., Kenneally B., Mooney M. Air flow behavior and gas dispersion in the recirculation ventilation system of a twin-tunnel construction. *Tunnelling and Underground Space Technology*, 2016, vol. 58, pp. 30–39. DOI: 10.1016/j.tust.2016.04.006
10. Li M., Aminossadati S.M., Wu C. Numerical simulation of air ventilation in super-large underground developments. *Tunnelling and Underground Space Technology*, 2016, vol. 52, pp. 38–43. DOI: 10.1016/j.tust.2015.11.009
11. Garcia-Diaz M., Sierra C., Miguel-Gonzalez C., Pereiras B. A Discussion on the effective ventilation distance in dead-end tunnels. *Energies*, 2019, vol. 12, pp. 3352. Available at: <https://www.mdpi.com/1996-1073/12/17/3352> (accessed 16 October 2023).
12. Chang X., Jaturapitakkul C., Ren J., Yang R. *Numerical simulation of tunnel ventilation considering air leakage mechanism of air duct*. Available at: <https://doi.org/10.21203/rs.3.rs-3247155/v1> accessed 16 October 2023).
13. Feroze T. An initial investigation of room and pillar ventilation using CFD. *24th international mining congress and exhibition of turkey*. Antalya, Turkey, 2015. pp. 1–8.
14. Meyer C.F. *The effect of last through road air velocities on unventilated headings*. Republic of South Africa, Project Chamber of Mines Research Organisation (COMRO), no. CC8E10, 1989. 15 p.
15. Kazakov B.P., Shalimov A.V., Levin L.Yu. Ventilating large cross-section tunnels with using ventilator working without a brattice. *Izvestiya of the Tula state University. earth science*, 2010, no. 2, pp. 89–97. (In Russ.)
16. Fainbug G.Z., Semin M.A., Isaevich A.G. Interrelation of physical mechanisms, mathematical models and technical methods of ventilation of dead-end stopes. *Mining echo*, 2020, no. 3 (80), pp. 131–137. (In Russ.)
17. Fainbug G.Z., Isaevich A.G. Analysis of microcirculation flows between microzones in face areas of blind shear stopes in potash mines with different ventilation methods. *Mining information and analytical bulletin (scientific and technical journal)*, 2020, vol. 3, pp. 58–73. (In Russ.)
18. Kolesov E.V., Nakaryakov E.V. Selection of turbulence model in ventilation modeling for blind stopes. *IOP Conference Series: Earth and Environmental Science*, 2021, vol. 773, no. 1, p. 012071.
19. Voronin V.N. *Fundamentals of the mine aero-gas dynamics*. Moscow, Leningrad, Ugletekhizdat Publ., 1951. 492 p. (In Russ.)
20. Pyannikov V.P. *Improving the efficiency of airing dead-end mine workings during operation of load–haul–dump machinery with internal combustion engines*. Cand. Diss. Yekaterinburg, 2005. 198 p. (In Russ.)
21. Nakaryakov E.V., Semin M.A., Grishin E.L., Kolesov E.V. Analysis of the regularities of accumulation and removal of the exhaust gases from the combustion-engined vehicles in the dead-end chamber-like mine workings. *Occupational Safety in Industry*, 2021, no. 5, pp. 41–47. (In Russ.)
22. Nakaryakov E.V., Grishin E.L. Ventilation in long blind stopes during operation of load–haul–dumpers with combustion engines. *IOP Conference Series: Earth and Environmental Science*, 2021, vol. 773, no. 1, p. 012077.

Information about the authors

Evgenii V. Nakariakov, Engineer, Mining Institute of the Ural Branch of the Russian Academy of Sciences, 78a, Sibirskaya street, Perm, 614007, Russian Federation. nakariakov.ev@gmail.com, <https://orcid.org/0009-0005-8950-3951>

Evgenii L. Grishin, Cand. Sc., Head of the Aerologic Safety Sector, Mining Institute of the Ural Branch of the Russian Academy of Sciences, 78a, Sibirskaya street, Perm, 614007, Russian Federation. aeroevg@mail.ru, <https://orcid.org/0000-0002-1091-3976>

Lev Yu. Levin, Dr. Sc., Professor, Correspondent Member of the Russian Academy of Sciences, Head of the Aerology and Thermophysics Department Mining Institute of the Ural Branch of the Russian Academy of Sciences, 78a, Sibirskaya street, Perm, 614007, Russian Federation. aerolog_lev@mail.ru, <https://orcid.org/0000-0003-0767-9207>

Received: 27.10.2023

Revised: 21.11.2023

Accepted: 03.09.2024

УДК 556.334.5
DOI: 10.18799/24131830/2024/9/4455
Шифр специальности ВАК: 1.6.6

Особенности формирования природно-техногенных систем в пределах участков закачки Далдынского кимберлитового поля (Западная Якутия)

А.М. Янников✉, А.Ю. Корепанов, А.С. Стручкова

Институт «Якутнипроалмаз» АК «АЛРОСА» ПАО, Россия, г. Мирный

✉Yannikov90@mail.ru

Аннотация. Актуальность. Коренные месторождения алмазов, отрабатываемые АК АЛРОСА на территории Западной Якутии, имеют повсеместное обводнение различной интенсивности подмерзлотными и межмерзлотными крепкими и весьма крепкими рассолами. В настоящее время образующиеся дренажные воды закачиваются обратно в недра в толщу многолетнемерзлых пород, что приводит к формированию природно-техногенных водоносных горизонтов, требующих постоянного контроля, мониторинга и изучения. **Цель.** Выявление особенностей формирования природно-техногенных систем в пределах участков закачки Далдынского кимберлитового поля, определение объема вод криолитозоны, вовлеченных в этот процесс, а также их характеристика для подтверждения экологичности способа обращения с дренажными рассолами. **Объект.** Техногенные водоносные горизонты, формирующиеся в пределах второго яруса криогенной толщи в процессе закачки дренажных рассолов коренных месторождений алмазов. **Методы.** Полевые работы состояли в ежеквартальном режимном опробовании наблюдательных и закачных скважин. Оценка техногенного влияния, а также последующее прогнозирование динамики изменения криогидрогеологических условий и гидродинамического режима осуществлены методами моделирования в ПО Feflow. Дополнительным методом выступал аналитический балансовый расчёт по параметру изменяющейся минерализации. **Результаты.** Взаимодействие дренажных вод с водами криолитозоны приводит к площадным изменениям минерализации без существенных изменений доминирующих анионов и катионов в пределах изучаемых объектов, формируя на периферийных частях равновесную природно-техногенную систему относительно фоновых температурных условий. Объём сформировавшихся техногенных водоносных горизонтов превысит 300 млн м³. Процесс вовлечения вод криогенной толщи, несмотря на значительные объёмы, имеет положительное влияние на экологическое состояние территории, т. к. в периферийных частях образующихся водоносных горизонтов формируются равновесные криогидрогеологические условия, характерные для природных криопэгов региона исследований.

Ключевые слова: многолетнемерзлые породы, рассолы, дренажные воды, участки закачки, техногенные водоносные горизонты, криолитозона

Для цитирования: Янников А.М., Корепанов А.Ю., Стручкова А.С. Особенности формирования природно-техногенных систем в пределах участков закачки Далдынского кимберлитового поля (Западная Якутия) // Известия Томского политехнического университета. Инжиниринг георесурсов. – 2024. – Т. 335. – № 9. – С. 61–72. DOI: 10.18799/24131830/2024/9/4455

UDC 556.334.5
DOI: 10.18799/24131830/2024/9/4455

Features of the formation of natural-technical systems within the injection areas of the Daldyn kimberlite field (Western Yakutia)

A.M. Yannikov✉, A.Yu. Korepanov, A.S. Struchkova

Institute "Yakutnioproalmaz" PJSC ALROSA, Mirny, Russian Federation

✉YannikovAM@alrosa.ru

Abstract. Relevance. Primary diamond deposits mined by PJSC ALROSA in Western Yakutia have widespread watering of varying intensity with sub-permafrost and inter-permafrost strong and very strong brines. Currently, the resulting drainage waters are pumped back into the depths of the permafrost, which leads to the formation of natural-technogenic aquifers that require constant control, monitoring and study. **Aim.** Identification of the features of the formation of natural-technogenic systems within the injection areas of the Daldyn kimberlite field, determination of the volume of permafrost waters involved in this process, as well as their characteristics to confirm the environmental friendliness of the method of handling drainage brines. **Methods.** Field work consisted of quarterly routine testing of observation and injection wells. Assessment of technogenic influence, as well as subsequent forecasting of the dynamics of changes in cryohydrogeological conditions and hydrodynamic regime, was carried out using modeling methods in Feflow software. An additional method was analytical balance calculation based on the parameter of changing mineralization. **Results and conclusions.** The interaction of drainage waters with permafrost waters leads to areal changes in mineralization without significant changes in the dominant anions and cations within the studied objects, forming an equilibrium natural-technogenic system in the peripheral parts relative to background temperature conditions. The volume of formed man-made aquifers will exceed 300 million m³. The process of involving cryogenic waters, despite the significant volumes, has a positive impact on the ecological state of the territory, because in the peripheral parts of the resulting aquifers, equilibrium cryohydrogeological conditions are formed, characteristic of natural cryopegs in the region of study.

Keywords: permafrost, brines, drainage waters, injection sites, technogenic aquifers, permafrost zone

For citation: Yannikov A.M., Korepanov A.Yu., Struchkova A.S. Features of the formation of natural-technical systems within the injection areas of the Daldyn kimberlite field (Western Yakutia). *Bulletin of the Tomsk Polytechnic University. Geo Assets Engineering*, 2024, vol. 335, no. 9, pp. 61–72. DOI: 10.18799/24131830/2024/9/4455

Введение

Вопросы обращения с дренажными водами одни из острейших в добывающей промышленности. Зачастую формирующиеся воды по ряду показателей не могут быть полноценно очищены, или очистка таких вод приводит к формированию сопутствующей остаточной рапы, утилизация которой требует отдельных технических решений. Поэтому в АК АЛРОСА в качестве основного метода обращения с дренажными водами выступает их закачка обратно в недра. Этот способ выбран по причине не только высокой минерализации образующихся вод (100–300 г/литр и выше), но и из-за локальных горно-геологических и криогидрогеологических особенностей кимберлитовых трубок Западной Якутии. Закачка производится в два типа коллекторов: в региональные подмерзлотные водоносные комплексы и в коллекторы толщи многолетнемерзлых пород (ММП) [1].

При использовании в качестве рассолопоглощающей толщи ММП в результате взаимодействия крепких и весьма крепких рассолов (по Е.В. Пиннекеру) с водами криолитозоны происходит формирование природно-техногенных систем, требующих постоянного контроля, мониторинга и изучения [2]. Техногенное влияние отработки на криогидрогеологическую среду заключается в:

- образовании депрессионных воронок из-за работы систем опережающего водопонижения и разгрузки массива вмещающих пород, что характерно для всех территорий интенсивного промышленного освоения;
- формировании репрессионных куполов в результате процесса обратной закачки, компенсирующих и ограничивающих развитие депрессий;

- формировании техногенных водоносных горизонтов в нижней (подошвенной) части толщи ММП с последующим вертикальным массопереносом, приуроченным к зонам динамического воздействия региональных разрывных нарушений в ниже залегающие водоносные комплексы [3, 4].

Необходимо отметить, что реализованная в пределах Якутской алмазодобывающей провинции система откачка/закачка по своим масштабам и объемам перекачиваемых вод не имеет аналогов как в нашей стране, так и за рубежом [5–9 и др.]. Изучение процессов трансформации криогидрогеологических условий в пределах участков закачки необходимо для подтверждения экологичности принятого способа обращения с крепкими и весьма крепкими дренажными водами. Это не только позволяет безопасно эксплуатировать уже построенные участки, но и дает возможность масштабировать имеющийся опыт с последующим тиражированием на смежные направления.

Для закачки рассолов трубок Далдынского кимберлитового поля используются породы второго яруса толщи ММП. Интервалы формируемых техногенных водоносных горизонтов выделяются в разрезе на глубинах 150–280 м от дневной поверхности. Всего по указанному принципу в период с 1985 по 2022 гг. в пределах Далдынского кимберлитового поля было построено четыре участка: «Октябрьский», «Киенгский», «Левобережный» и «Левобережный-2». В настоящее время в эксплуатации находятся участки «Киенгский», «Левобережный» и «Левобережный-2». Закачка рассолов в толщи ММП привела к формированию межмерзлотных техногенных горизонтов, приуроченных к

перечисленным участкам. Причём в результате растворения льдистой составляющей в пределах участков «Киенгский» и «Левобережный» были сформированы подтверждённые вертикальные зоны массопереноса в ниже залегающий подмерзлотный верхнекембрийский водоносный комплекс (ВВК). Ввиду невысоких фильтрационных параметров наблюдается локальное изменение напоров в пределах прямого воздействия от участков закачки. Расход перетекания из техногенного водоносного горизонта в ВВК на участке «Киенгский» в зоне динамического влияния Октябрьского разлома составляет 490 м³/сут; а на участке «Левобережный» – 4570 м³/сут, что обеспечивает наличие зоны техногенного питания для частично сдренированного ВВК [10].

Процесс формирования техногенных водоносных горизонтов сопряжён с вовлечением вод криолитозоны, изначально находившихся в твёрдой фазе. Процесс вовлечения подтверждается изменением химического состава вод как в плане, так и в разрезе, выявленном при режимном опробовании по сети наблюдательных и закачных скважин.

Целью проводимых исследований являлось выявление особенностей формирования природно-техногенных систем в пределах участков закачки «Киенгский» и «Левобережный» Далдынского кимберлитового поля, определение объема вод криолитозоны, вовлеченных в этот процесс, а также их характеристика для подтверждения экологичности способа обращения с дренажными рассолами.

Рациональное недропользование, а также необходимость соблюдения экологической безопасности выбранного способа обращения с дренажными водами требуют выполнения комплекса исследований, включающего в себя следующие задачи:

- постоянный контроль над параметрами закачиваемых вод (температура и минерализация);
- режимные замеры уровня режима по сети закачных и наблюдательных скважин в пределах каждого участка закачки;
- проведение геофизических исследований методами наземной электроразведки, ГИС, расходомерии и термометрии по стволам скважин;
- выполнение пробоотбора по стволам закачных и наблюдательных скважин для контроля минерализации формируемого техногенного водоносного горизонта;
- проведение гидрогеологического моделирования для получения качественного и долгосрочного прогноза, а также подтверждения полезной емкости участков;
- определение объема вовлеченных вод криолитозоны в пределах участков закачки.

Геокриологические условия территории исследования

Территория Далдынского кимберлитового поля входит в состав северной геокриологической зоны Сибирской платформы (северо-континентальная подзона), которая характеризуется [11]:

- сплошным распространением ММП;
- непрерывностью мощной криогенной толщи, составляющей до 800 м (в пределах перспективной площади Сугунахской структуры);
- температурой пород первого яруса криолитозоны в неизмененных условиях от –2 до –6 °С.

Основной чертой климата региона является резкая континентальность, северная часть территории Далдынского кимберлитового поля характеризуется субарктическим климатом. Низкая среднегодовая температура воздуха и отрицательный годовой радиационный баланс (–0,5...–2,0 ккал/см²·мес) благоприятствуют сохранению, а также локальному преобразованию температурных полей мерзлых массивов. Температурный режим мерзлой толщи имеет прямую связь с температурой земной поверхности и формируется, кроме всего, под воздействием климатических, ландшафтных, геоморфологических и других факторов.

Многолетнемёрзлые породы представлены карбонатно-глинистыми отложениями моркокинской, реже мархинской свит, а на участке «Киенгский» еще и породами онхойюряхской свиты и олдондинской свиты нижнего ордовика. Верхний ярус слагают ММП, содержащие льды различных типов, заполняющие поры, каверны, трещины [12]. Нижний ярус состоит из охлажденных пород, пустоты которых заполнены солеными водами и рассолами с отрицательной температурой – криопэгами. Промежуточное значение занимает ярус морозных недонасыщенных пород. Необходимо отметить, что в процессе различных исследований последних лет в регионе представление о строении верхнего яруса криолитозоны несколько изменилось. Некоторыми скважинами в толще ММП зафиксированы реликтовые линзы соленых вод и рассолов в нижнеордовикских отложениях. Изолированность и линзообразный характер таких водонасыщенных толщ доказаны с помощью опытно-фильтрационных исследований. Наличие реликтовых линз послужило основанием для выделения межмерзлотного типа подземных вод [12, 13]. Они служат зоной постепенного перехода от ММП к водонасыщенным и одновременно охлажденным породам, имеющим отрицательную температуру. Мощность этой переходной зоны незначительная и не превышает 10 м. Кроме того, в мерзлой толще встречаются единичные маломощные (до 1–5 м) линзы талых пород, не содержащие гравитационную воду. Они могут залегать на различных глубинах в зависимости от мощности яруса ММП.

Использование толщи ММП для закачки дренажных вод в пределах Далдынского кимберлитового поля, прежде всего, связано с большой глубиной залегания (не менее 1200 м от дневной поверхности) высокопроницаемых коллекторов, пригодных для закачки.

После проведенного комплекса исследований, выполненных коллективом авторов ИМЗ СО РАН и ИЗК СО РАН, была обоснована принципиальная возможность использования второго яруса криолитозоны для организации закачки. Первый участок, отработанный по этому принципу и находящийся сейчас на стадии рекультивации, – «Октябрьский» [14].

Методы

Выполненные исследования состояли из двух блоков: полевого и камерального. Полевые работы состояли в режимном опробовании наблюдательных и закачных скважин, осуществляемом на ежеквартальной основе. Объемы выполненных работ приведены в табл. 1. Отбор проб рассолов осуществлялся с целью изучения качественного состава подземных вод в результате закачки дренажных вод. Отбор проб производился пробоотборниками марки ВПП-300, ПО-48, ПСП-76.

Определение химического состава отобранных рассолов выполнялось в специализированной аккредитованной лаборатории института Якутнипроалмаз. Опробование проводилось комплексно по всем скважинам участка, что позволило получить результаты состава применительно к центральной, фланговым и периферийным частям техногенных водоносных горизонтов.

Оценка техногенного влияния, а также последующее прогнозирование динамики изменения криогидрогеологических условий и гидродинамического режима в пределах участков закачки были осуществлены методами моделирования в ПО Feflow. На основании анализа имеющихся данных по мерзлотно-гидрогеологическим условиям территории исследования закачки дренажных вод, результатов бурения и освоения скважин, результатов опытно-промышленных работ были разработаны

гидрогеологические модели, позволившие решить задачи определения полезной ёмкости каждого из находящихся в эксплуатации участков, а также определить срок их эксплуатации. Построение и последующая калибровка моделей осуществлялась согласно общепринятым методикам, с учётом локальных особенностей структурно-тектонического строения, а также литолого-фациальных и криогидрогеологических условий каждого отдельного участка [15]. С учётом планового расположения скважин с помощью ПО Feflow была составлена схема распределения минерализации в сформированном техногенном водоносном комплексе. Таким образом, модель, построенная с учётом изменяющейся минерализации рассолов техногенного водоносного горизонта, – основной инструмент определения объема вовлеченных вод криолитозоны.

Дополнительным методом выступал аналитический балансовый расчёт, основанный на изменяющейся минерализации вод в пределах формируемого техногенного водоносного горизонта. Изначальная минерализация закачиваемых дренажных вод, хоть и подвержена сезонным колебаниям, в среднем составляет ~350 г/л. Площадное опробование позволяет оценить фактическое распределение минерализации, а известный объём изначально закачанных вод позволяет определить объём вод, необходимый для фиксируемых изменений.

Данный метод был основан на допущении, что зафиксированное распределение периферийных частей техногенных водоносных комплексов происходит из-за разбавления закачиваемых дренажных рассолов в процессе взаимодействия с водами криолитозоны, без учёта влияния плотностной седиментации вод. Основным критерием оценки количества вовлеченных вод криолитозоны были объём и расход дренажных рассолов тр. Удачная, закачанных в пределах изучаемых участков. На основании вышесказанного в рамках статьи были выполнены прогнозные расчёты изменения минерализации в пределах отдельных блоков, а также определен единый расход, требуемый для формирования фиксируемой минерализации.

Таблица 1. Объёмы полевых исследований

Table 1. Volumes of field studies

Кимберлитовое поле Kimberlite field	Дренажные воды месторождения Deposit drainage waters	Участок Site	Площадь, км ² Site area, km ²	Количество скважин, шт Amount of wells, pcs	Количество проб рассолов, шт. Amount of brine samples, pcs
Далдынское Daldyn	тр. Удачная pipe Udachnaya	Октябрьский Oktyabrsky	15	участок рекультивирован the site has been reclaimed	
		Киенгский Kiengsky	35	65	260
		Левобережный Levoberezhny	50	45	180
		Левобережный-2 Levoberezhny-2	40	20	80

Результаты исследования и их обсуждение

По результатам выполненного комплекса работ по участкам были определены наиболее проницаемые интервалы, характеризующиеся коллекторскими свойствами и способные обеспечить требуемую производительность закачки. Как правило, коллекторы представлены карбонатными (известняки и доломиты) и терригенно-карбонатными (алевролиты, реже мергели) породами, в интервале которых происходит формирование техногенных водоносных горизонтов. Для участков закачки Далдынского кимберлитового поля («Октябрьский», «Киенгский», «Левобережный» и «Левобережный-2») целевые коллекторы находятся в интервалах мархинской ($E_3 mgh_4$) и моркокинской ($E_3 mrgk$) свит верхнего кембрия.

На настоящее время суммарно во втором ярусе криолитозоны в пределах Далдынского кимберлитового поля было размещено свыше 44 млн m^3 дренажных вод, из которых:

- 10,6 млн m^3 в участок «Октябрьский»;
- 13,0 млн m^3 в участок «Киенгский»;
- 21,0 млн m^3 в участок «Левобережный»;
- 0,4 млн m^3 в участок «Левобережный-2».

Параметры эксплуатации участков, а также процент использования полезной ёмкости, определённые при помощи цифровых моделей, приведены в табл. 2.

Характеристика динамики изменений режима приведена по двум уникальным объектам – участкам «Киенгский» и «Левобережный». Уникальность данных участков обусловлена рядом фактов:

- оба участка интенсивно эксплуатировались на протяжении длительного периода времени, в результате полезная ёмкость была использована более чем на 80 %;
- закачка большого объема дренажных рассолов в пределах ограниченной площади привела к формированию в зонах динамического воздействия региональных разрывных нарушений зон вертикальной фильтрации со значительными расходами перетекания в ниже залегающий

подмерзлотный верхнекембрийский водоносный комплекс, сформировав новые природно-техногенные геосистемы, позволяющие рассматривать закачку во второй ярус криолитозоны именно как способ обращения с дренажными водами, а не изоляции (как считалось ранее). Данный факт подтверждается режимными наблюдениями за уровнем режимом по скважинам, оборудованным для отдельных наблюдений за подмерзлотным верхнекембрийским водоносным комплексом и техногенным водоносным горизонтом. Именно характер изменения уровня режима, а также применение современных методов гидрогеологического моделирования позволили определить параметры вертикального перетекания. Формирование таких систем требует дополнительного изучения, т. к. данный факт был выявлен сравнительно недавно – менее 10 лет назад;

- по причине интенсивности эксплуатации оба участка прошли все стадии формирования техногенных водоносных горизонтов (рис. 1, 2) с максимальной техногенной нагрузкой на криолитозону, что позволяет оценить степень воздействия процесса закачки на геологическую среду.

Необходимо отметить, что перед началом эксплуатации температура пород в пределах участков «Киенгский» и «Левобережный» была типична для территории исследований и составляла от -1 до -6 °C.

Первоначально при закачке рассолов распространение их в свободном ото льда трещинном пространстве ММП происходит при неполном насыщении под действием силы тяжести по хорошо проницаемым зонам [14]. При этом происходит таяние ледового заполнителя трещин, пор, каверн, увеличение их раскрытия, соединение отдельных проводящих зон как в горизонтальном, так и в вертикальном направлениях. Со временем за счет таяния льда формируется область полного насыщения свободного пространства в толще ММП рассолами, смешанными с водой растаявшего льда.

Таблица 2. Параметры эксплуатации участков закачки Далдынского кимберлитового поля

Table 2. Parameters of operation of injection sites of the Daldyn kimberlite field

Участок Site	Объём закачанных рассолов, m^3 Volume of injected brines, m^3	Оценённый объём, m^3 Estimated volume, m^3	% заполнения Fill percentage	Период закачки, гг. Injection period, years	Прогнозный срок эксплуата- ции, гг. Expected ser- vice life, years	Интервал формиро- вания техногенного во- доносного горизонта, м Interval of formation of technogenic aquifer, m
Октябрьский Oktyabrsky	10600000	10600000	100	1985–2001	1985–2001	150–270
Киенгский Kiengsky	13000000	15500000	84	2001–2013	2001–2033	214–273
Левобережный Levoberezhny	21000000	25000000	84	2012–2023	2012–2027	180–295
Левобережный-2 Levoberezhny-2	400000	17000000	2	2021–2023	2021–2032	148–267

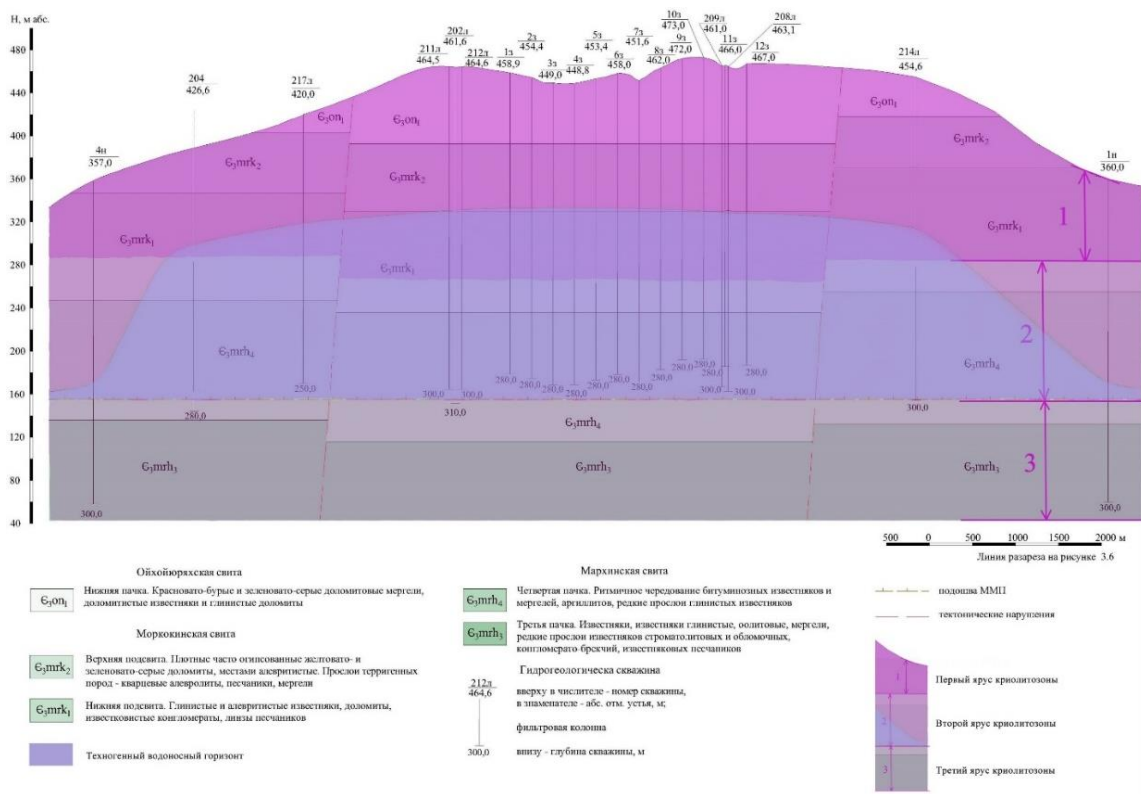


Рис. 1. Криогидрогеологический разрез участка «Левобережный»
Fig. 1. Cryohydrogeological section of the Levoberezhny site

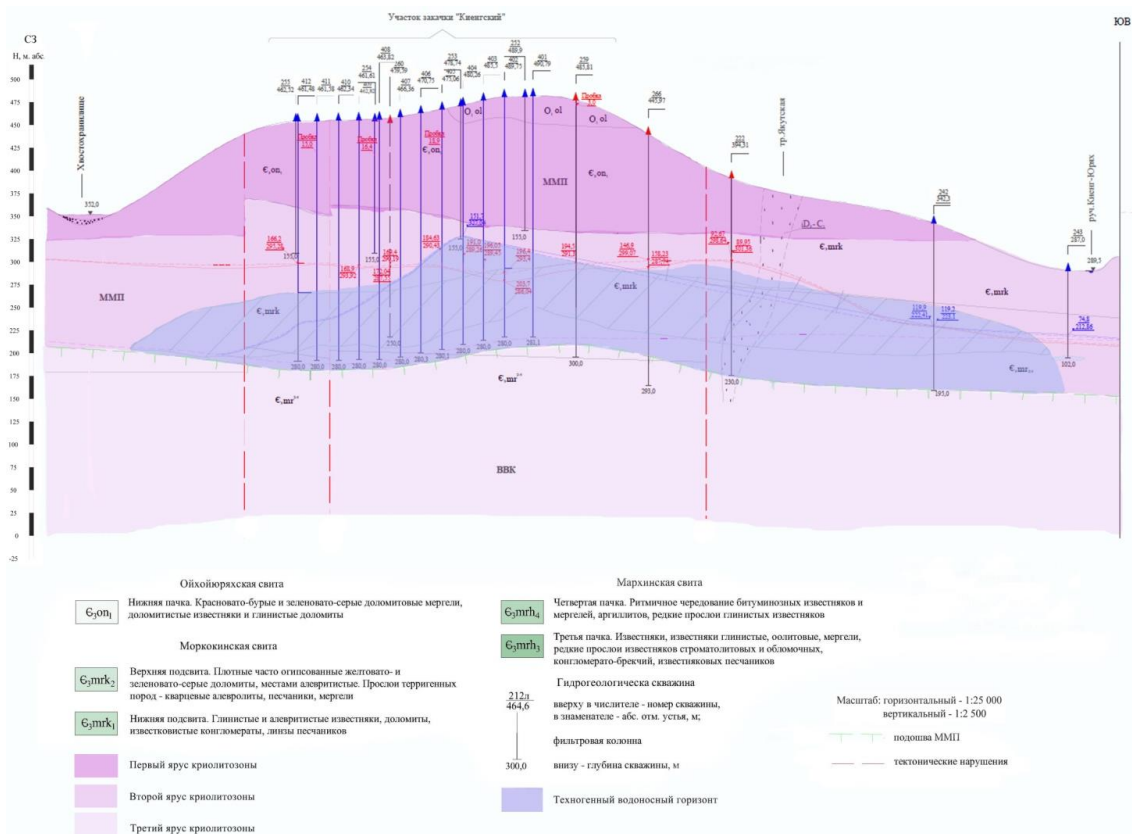


Рис. 2. Криогидрогеологический разрез участка «Киенгский»
Fig. 2. Cryohydrogeological section of the Kiengsky site

С этого времени движение рассолов будет происходить под действием градиента давлений и определяться законами Дарси и сохранения массы [16, 17]. В рассматриваемых условиях закачки дренажных вод в толще ММП формируется техногенный водоносный горизонт, содержащий рассолы с изменяющейся в пространстве и времени плотностью.

Для выявления тенденций по изменению геотермического режима по скважинам участка «Левобережный» был выполнен сопоставительный анализ изменения температур на начало эксплуатации и по состоянию на конец 2022 г. (табл. 3). Режимные геотермические наблюдения в районе работ позволили выявить характер трансформации температурного режима, связанной с закачкой дренажных рассолов. По сводным графикам скважин закачного ряда отчетливо можно отметить незначительное изменение температуры.

В период начала закачки в 2012 г. температура по закачным скважинам по стволу составляла от $-2,5$ до $-4,8$ °С, понижаясь с глубиной, к 2022 г. температура на интервалах уменьшилась и составляла от -3 до -6 °С. По наблюдательным скважинам в 2012 г. температура изменялась от $-1,9$ до $-4,9$ °С, в 2022 г. от $-2,5$ до $-5,4$ °С.

На участке закачки «Киенгский» в 2003 г. была начата эксплуатация, температура по стволу закачных скважины изменялась от $-1,6$ до $-2,38$ °С. Самая интенсивная закачка была в 2012 г., колебания температуры были в пределах от $-2,6$ до $-2,8$ °С, в пе-

риод с 2013 до 2022 гг. эксплуатация участка не производилась. С возобновлением закачки на участке температуры находятся в пределах от $-1,95$ до $-2,52$ °С. По наблюдательным скважинам в 2003 г. колебания составили от $-1,5$ до $3,3$ °С, в 2012 г. – от $-2,9$ до $-3,64$ °С, в 2022 г. – от $-2,2$ до $-3,44$ °С.

Полученные по участкам «Киенгский» и «Левобережный» данные позволяют говорить о влиянии процесса закачки на второй ярус криолитозоны с точки зрения изменения геотермического режима. Проведенным циклом наблюдений установлено, что на уровне рассолопоглощающих интервалов толщи ММП произошло общее снижение температур горных пород на $1,5$ – $2,2$ °С. Это связано главным образом с направлением миграции закачиваемых рассолов в криогенных толщах пород, а также с характером тепломассопереноса на участке закачки. Объёмы закачки позволяют сформировать выдержанные аномалии значительной площади, сопоставимые с площадью участков (35 км^2 – участок «Киенгский»; 50 км^2 – участок «Левобережный»), т. к. продолжительность и интенсивность воздействия уже не компенсируются инертностью процессов криолитозоны (табл. 3).

Необходимо отметить, что фиксируемое по скважинам участка «Киенгский» распределение температур свидетельствует о достаточно однородном распределении закачиваемых вод, т. е. о сходных гидродинамических параметрах в интервале 120 – 270 м.

Таблица 3. Изменения температуры по стволу скважин

Table 3. Temperature changes along the wellbore

Глубина, м Depth, m	участок «Киенгский»/Kiengsky site						участок «Левобережный»/Levoberezhny site			
	скважины/wells									
	закачные injection			наблюдательные observation			закачные injection		наблюдательные observation	
	температура по стволу скважины/wellbore temperature, °C									
	2003	2012	2022	2003	2012	2022	2012	2022	2012	2022
100	-1,6	-2,8	-1,95	-1,5	-2,9	-2,2	-2,5	-3	-1,9	-2,5
110	-1,8	-2,7	-2,2	-2,17	-3,4	-2,8	-2,5	-3	-2,2	-3,2
120	-2	-2,66	-2,4	-2,6	-3,55	-3	-2,5	-3	-2,8	-3,6
130	-2,05	-2,66	-2,4	-3,1	-3,62	-3,4	-2,6	-3,1	-3,1	-4,1
140	-2,12	-2,66	-2,5	-3,3	-3,64	-3,44	-2,65	-3,4	-3,3	-5,1
150	-2,2	-2,66	-2,52	-3,3	-3,64	-3,44	-2,7	-3,1	-3,4	-5,5
160	-2,2	-2,66	-2,52	-3,3	-3,64	-3,44	-2,7	-3,5	-3,8	-5,6
170	-2,2	-2,66	-2,52	-3,3	-3,64	-3,44	-3,2	-3,3	-3,9	-4,8
180	-2,2	-2,66	-2,52	-3,3	-3,64	-3,44	-3,2	-4,6	-4	-4,8
190	-2,2	-2,66	-2,52	-3,3	-3,64	-3,44	-3,8	-4,7	-4,4	-4,9
200	-2,2	-2,66	-2,52	-3,3	-3,64	-3,44	-4,1	-4,75	-4,9	-5,3
210	-2,2	-2,66	-2,52	-3,3	-3,64	-3,44	-4,5	-4,9	-4,9	-5,3
220	-2,2	-2,66	-2,52	-3,3	-3,64	-3,44	-4,6	-6	-4,9	-5,4
230	-2,2	-2,66	-2,52	-3,3	-3,64	-3,44	-4,6	-6	-4,3	-5,4
240	-2,2	-2,66	-2,52	-3,3	-3,64	-3,44	-4,7	-5,6	-4,3	-5,4
250	-2,3	-2,66	-2,52	-3,3	-3,64	-3,44	-4,8	-5,6	-4,3	-5,3
260	-2,3	-2,66	-2,52	-3,3	-3,64	-3,44	-4,5	-5,4	-4	-5,2
270	-2,38	-2,65	-2,52	-3,3	-3,64	-3,44	-4,5	-5	-4	-5,2

Наблюдаемый процесс уменьшения температуры связан с режимом эксплуатации участков [18, 19]. Дренажные воды, собираемые в руднике, транспортируются по магистральным трубопроводам на расстояния до 20 км. Как отмечалось ранее, в пределах Далдынского кимберлитового поля доминируют отрицательные температуры окружающего воздуха: среднегодовая температура воздуха за многолетний период составляет $-9,5\text{ }^{\circ}\text{C}$; среднемесячная температура воздуха самого холодного месяца – января, составляет $-30,6\text{ }^{\circ}\text{C}$, что, в свою очередь, приводит к понижению температуры закачиваемых вод до $-8/-10\text{ }^{\circ}\text{C}$ (в отдельные месяцы температура может опускаться до $-15\text{ }^{\circ}\text{C}$), высокая минерализация до 300–350 г/литр препятствует их замерзанию и позволяет производить закачку.

Учитывая принцип продвижения закачиваемых рассолов в породах второго яруса криолитозоны, а также результаты режимных наблюдений, ставших основой для прогнозного гидродинамического моделирования, можно с уверенностью констатировать, что эксплуатация участков привела к вовлечению в процесс формирования техногенных водоносных горизонтов существенных объёмов вод криолитозоны. Подтверждением данного факта служит существенное уменьшение минерализации вод (с 300–350 до 40–60 г/литр), фиксируемое при опробовании наблюдательных скважин периферийных частей участков.

Химический состав техногенных вод, отобранных из скважин периферийных частей участка «Киенгский», характеризуется как хлоридный магниево-кальциевый. Формула среднего солевого состава вод имеет следующий вид:

- юго-западная часть участка:

$$M42ph4.8 \frac{Cl99SO_4 1}{Ca50Mg29(Na+K)21}; \frac{Ca}{Mg} 1.76; \frac{Na+K}{Cl} 0.22;$$

- северная часть участка:

$$M88ph5.0 \frac{Cl99SO_4 1}{Ca52Mg29(Na+K)19}; \frac{Ca}{Mg} 1.8; \frac{Na+K}{Cl} 0.19;$$

- восточная часть участка:

$$M44ph5.3 \frac{Cl98SO_4 2}{Ca54Mg32(Na+K)14}; \frac{Ca}{Mg} 1.7; \frac{Na+K}{Cl} 0.14;$$

- юг-юго-восточная часть участка:

$$M53ph5.0 \frac{Cl99SO_4 1}{Ca52Mg28(Na+K)20}; \frac{Ca}{Mg} 1.91; \frac{Na+K}{Cl} 0.21.$$

Опробование скважин участка «Левобережный» указывает на схожие трансформационные изменения:

- скважины, удаленные от закачных на расстояние до 1000 м:

$$M141 \frac{Cl99}{Ca50Mg28(Na+K)21} pH5.3;$$

$$\frac{rSO_4 * 100}{rCl} 0.58 \frac{(rNa+rK)*100}{M} 0.4 \frac{rNa+rK}{rCl} 0.22 \frac{rCa}{rMg} 2 \frac{rCl}{Br} 61.07;$$

- скважины в периферийных частях участка:

$$M106 \frac{Cl99}{Ca45Mg34(Na+K)21} pH4.9 \frac{rSO_4 * 100}{rCl} \times$$

$$\times 0.48 \frac{(rNa+rK)*100}{M} 0.39 \frac{rNa+rK}{rCl} 0.21 \frac{rCa}{rMg} 1.53 \frac{rCl}{Br} 59.07.$$

С учётом планового расположения скважин, а также моделирования в специализированном ПО была составлена схема распределения минерализации в сформированном техногенном водоносном комплексе (рис. 3).

Отдельно необходимо отметить, что схожие закономерности распределения минерализации были выявлены даже на начальных стадиях формирования техногенного водоносного горизонта при изучении участка «Ноябрьский» Алакит-Мархинского кимберлитового поля [20].

Происходящие площадные изменения минерализации, наблюдаемые в техногенных водоносных горизонтах, связаны с взаимодействием закачиваемых рассолов и преимущественно пресных вод криогенной толщи, находящихся первоначально в твёрдом фазовом состоянии.

Для определения минерализации природно-техногенного водоносного горизонта была использована формула (1), исходя из которой известна минерализация закачиваемых вод и их ежесуточный объём, а с учётом известного значения минерализации в конкретной области (зоне) участка можно определить единичный расход и в пересчёте на время – объём вод криогенной толщи, вовлечённый в процесс разбавления закаченных дренажных рассолов.

$$M_{cm} = \frac{M_{tv} * Q_{tv} + M_p * Q_p}{Q_{tv} + Q_p}, \quad (1)$$

где M_{cm} – минерализация техногенного водоносного горизонта, сформировавшаяся в результате смешения дренажных рассолов и вод криогенной толщи; M_{tv} – средняя минерализация вод криогенной толщи, замеренная в льдистой фракции керна материала в процессе бурения, которая составляет 2 г/л.; Q_{tv} – расход вод криолитозоны, возникающий в результате плавления льда; M_p – минерализация дренажных рассолов, составляет 350 г/л.; Q_p – расход закачки дренажных рассолов (средневзвешенное значение расхода за год).

Оценка единичного расхода вовлекаемых вод криолитозоны была выполнена по зависимости и отображена на диаграмме (рис. 4).

Объёмы вод криогенной толщи, которые будут вовлечены в процесс формирования природно-техногенных водоносных горизонтов в пределах участков закачки (при условии соблюдения сроков эксплуатации и объёмов закачиваемых вод, приведенных в табл. 2), были определены при помощи моделирования в ПО Feflow и сопутствующих аналитических расчётов по приведенным ранее закономерностям.

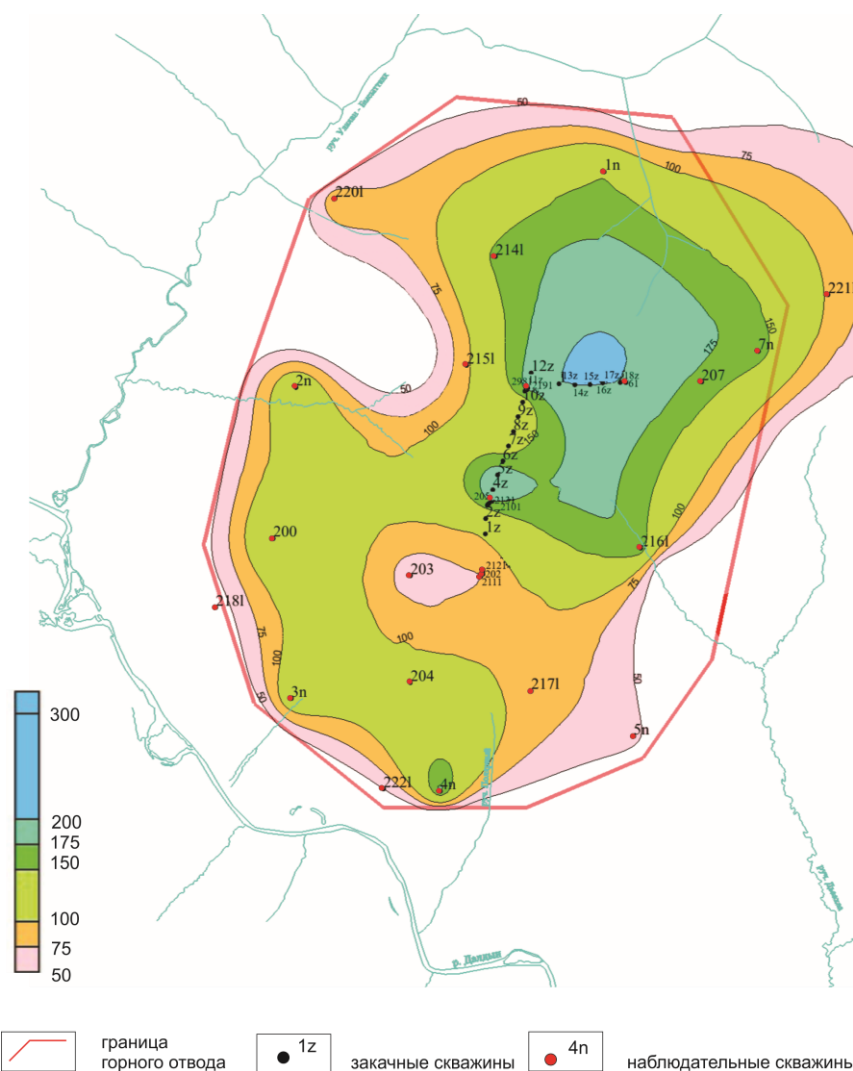


Рис. 3. Схема распределения минерализации природно-техногенного водоносного горизонта на участке «Левобережный» (г/л)
Fig. 3. Scheme of distribution of mineralization of the natural-technogenic aquifer in the Levoberezhny site (g/l)

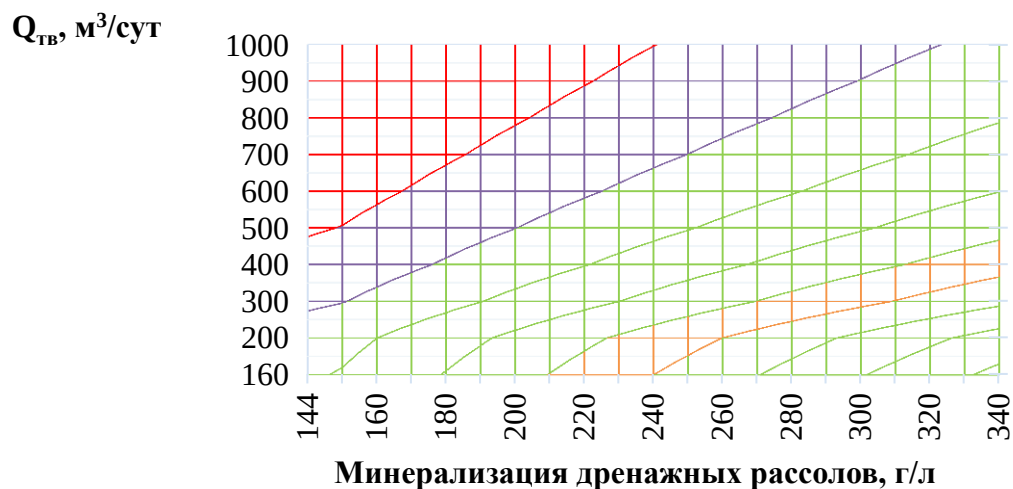


Рис. 4. Минерализация смешанных вод в зависимости от величины вовлекаемых вод криолитозоны и изначальной минерализации дренажных рассолов: красный цвет – 40–60 г/л; желтый – 60–80 г/л; зеленый – 80–200 г/л
Fig. 4. Mineralization of mixed waters depending on the size of the involved permafrost waters and the initial mineralization of drainage brines: red color – 40–60 g/l; yellow – 60–80 g/l; green – 80–200 g/l

Площадное распределение параметра минерализации вод природно-техногенного водоносного горизонта было руководящим фактором по определению единичного расхода вод криогенной толщи, а методы современного моделирования позволили выполнить временную привязку к параметрам эксплуатации участка, а именно к изменяющейся во времени производительности закачки, а не базироваться только на усреднённых величинах объёма закачанных вод и их минерализации, которые дают более высокую погрешность.

Прогнозный объём вод криолитозоны, вовлечённый в процесс формирования природно-техногенных геосистем (при полном заполнении участков) для техногенного водоносного горизонта, связанного зонами вертикальной фильтрации с природным подмерзлотным верхнекембрийским водоносным комплексом в пределах Далдынского кимберлитового поля, составит:

- для участка «Октябрьский» от 40,0 до 45,0 млн м³;
- для участка «Киенгский» от 65,0 до 70,0 млн м³;
- для участка «Левобережный» от 85,0 до 100,0 млн м³;
- для участка «Левобережный-2» от 75,0 до 85,0 млн м³;

Полученная в процессе исследования информация позволяет оценить техногенное воздействие в пределах Далдынского кимберлитового поля. На первом этапе площади участков «Киенгский» и «Левобережный», сформированных во втором ярусе криолитозоны в пределах природно-техногенных систем, составят порядка 85–90 км² и могут быть охарактеризованы как локальные. Однако дальнейшее развитие системы закачки рудника Удачный (планируемое в период 2030–2050 гг.) с использованием дополнительных, в том числе и перспективных, участков: «Левобережный-2», «Далдынский», «Правобережный» и «Сугунахский» [21], увеличит их суммарную площадь до 250 км², что позволит отнести данное воздействие к региональному, т. е. верхнекембрийский водоносный комплекс получит область обеспеченного питания, связанного с формированием техногенных водоносных горизонтов в пределах участков закачки с суммарным объёмом, с учётом вовлечённых вод криолитозоны до 500 млн м³ (0,5 км³). Этот процесс компенсирует сформировавшуюся в интервале верхнекембрийского комплекса депрессионную воронку, уменьшив её радиус, и приведёт к росту притоков (до 30–40 %) к карьерам трубок Зарница и Удачная. Однако, учитывая невысокие параметры водопроводимости коллекторов данного водоносного комплекса, в абсолютных цифрах суммарные притоки будут составлять до 80 м³/сут (0,2 % от суммарного прогнозного притока к месторождениям Далдынского кимберлитового поля, формирующегося в результате дренажа верх-

некембрийского, среднекембрийского и нижнекембрийского водоносных комплексов).

Выводы

Закачка крепких и весьма крепких дренажных рассолов приводит к формированию техногенных водоносных горизонтов в интервалах высокопроницаемых пород второго яруса криогенной толщи. Этот процесс приводит к локальной трансформации криогидрогеологических условий, связанных с температурой и минерализацией закачиваемых вод. Взаимодействие дренажных вод с водами криолитозоны приводит к площадным изменениям минерализации без существенных изменений доминирующих анионов и катионов в пределах изучаемых объектов, формируя на периферийных частях равновесную природно-техногенную систему относительно фоновых температурных условий.

Наибольшие изменения изначальных криогидрогеологических условий, так же как и наибольшая техногенная нагрузка на геологическую среду, ожидаемо приурочены непосредственно к эпицентру закачки, что приводит к формированию линейных зон вертикальной фильтрации в ниже залегающие природные водоносные комплексы.

Выполненные исследования и прогнозные расчёты подтверждают значительное техногенное воздействие и сопряжённую трансформацию в пределах Далдынского кимберлитового поля, что обусловлено криогидрогеологическими условиями отработываемых месторождений. Объём сформировавшихся техногенных водоносных горизонтов составит более 300 млн м³. Процесс вовлечения вод криогенной толщи, несмотря на значительные объёмы, имеет положительное влияние на экологическое состояние территории, т. к. в периферийных частях образующихся водоносных горизонтов формируются равновесные криогидрогеологические условия, характерные для природных криопэгов региона исследований.

Проведённые исследования и результаты прогнозного моделирования позволяют сделать вывод, что использование метода закачки дренажных вод способствует уменьшению степени влияния горных и добычных работ (и связанного с ними водопонижения) как на геологическую среду изучаемого района, локализовав её на планомерно ограниченном, сравнительно небольшом по площади участке, на котором непосредственно осуществляется закачка, так и на окружающую среду в результате исключения попадания в поверхностные воды дренажных рассолов на всем жизненном цикле отработки месторождений.

Наблюдаемый положительный опыт эксплуатации, подтвержденный результатами исследований, позволяет утверждать о целесообразности дальнейшего тиражирования данного метода.

СПИСОК ЛИТЕРАТУРЫ

1. Колганов В.Ф., Акишев А.Н., Дроздов А.В. Горно-геологические особенности коренных месторождений алмазов Якутии. – Мирный: Мирнинская городская типография, 2013. – 568 с.
2. Вигандт В.А. Опыт сооружения и эксплуатации обратной закачки дренажных вод карьера «Мир» // Горный журн. – 1994. – № 9. – С. 60–62.
3. Дроздов А.В. Захоронение дренажных рассолов в многолетнемерзлых породах (на примере криолитозоны Сибирской платформы). – Иркутск: Изд-во ИГТУ, 2007. – 296 с.
4. Дроздов А.В., Гензель Г.Н. Проблемы эксплуатации системы обратной закачки дренажных вод карьера и рудника Мир // Геоэкология. Инженерная геология, гидрогеология, геокриология. – 2015. – № 4. – С. 304–316.
5. Гидрогеоэкологический контроль на полигонах закачки промышленных сточных вод (Методическое руководство) / под ред. В.П. Ильченко. – М.: ИРЦ Газпром, 2000. – 122 с.
6. Modelling borehole flows from Distributed Temperature Sensing data to monitor groundwater dynamics in fractured media / B. Pouladi, O. Bour, L. Longuevergne, B.J. de La, N. Simon // Journal of Hydrology. – 2021. – Vol. 598. – Article 126450. DOI: 10.1016/j.jhydrol.2021.126450.
7. Capes D. C., Steelman C.M., Parker B.L. Hydrologic interpretation of seasonally dynamic ambient temperature profiles in sealed bedrock boreholes // Journal of Hydrology. – 2018. – Vol. 567. – P. 133–148. DOI: <https://doi.org/10.1016/j.jhydrol.2018.10.005>.
8. Rajabi M.M., Ataie-Ashtiani B., Simmons C.T. Model-data interaction in groundwater studies: Review of methods, applications and future directions // Journal of Hydrology. – 2018. – Vol. 567. – P. 457–477. DOI: <https://doi.org/10.1016/j.jhydrol.2018.09.053>.
9. Utilizing cores for characterising the temperature and permeability regimes in a litho-stratigraphic model of the Montserrat geothermal system, Montserrat (Lesser Antilles arc, West Indies) / R.A. Basant, B.Y. Lynne, R. Ramsook, G.A. Ryan, O.O. Blake, J.E.P. Utley // Geothermics. – 2022. – Vol. 100. – Article 102341. DOI: 10.1016/j.geothermics.2021.102341.
10. Янников А.М. Гидрогеология Далдынского кимберлитового поля: Республика Саха (Якутия). – Мирный: Изд-во ЗЯНЦ/ЯНА, 2023. – 305 с.
11. Дроздов А.В., Иост Н.А., Лобанов В.В. Криогидрогеология алмазных месторождений Западной Якутии. – Иркутск: Изд-во ИГТУ, 2008. – 507 с.
12. Гидрогеология СССР. Т. XX. Якутская АССР. – М.: Недра, 1970. – 384 с.
13. Климовский И.В., Готовцев С.П. Криолитозона Якутской алмазоносной провинции. – Новосибирск: Наука, 1994. – 167 с.
14. Янников А.М., Стручкова А.С., Корепанов А.Ю. Моделирование гидродинамического режима техногенного водоносного горизонта в пределах участка «Ноябрьский» рудника «Айхал» // Науки о Земле и недропользование. – 2023. – Т. 46. – № 1 (82). – С. 20–35. DOI: <https://doi.org/10.21285/2686-9993-2023-46-1-20-35>
15. Первый опыт захоронения соленых дренажных вод карьера трубки Удачная в многолетнемерзлые породы / С.В. Алексеев, А.В. Дроздов, Т.И. Дроздова, Л.П. Алексеева // Криосфера Земли. – 2002. – Т. VI. – № 2. – С. 61–65.
16. The role of seawater freezing in the formation of subsurface brines / B. Herut, A. Starinsky, A. Katz, A. Bein // Geochimica et Cosmochimica Acta. – 1990. – Vol. 54. – Iss. 1. – P. 13–21. DOI: [https://doi.org/10.1016/0016-7037\(90\)90190-V](https://doi.org/10.1016/0016-7037(90)90190-V).
17. Han L., Menzel L. Hydrological variability in southern Siberia and the role of permafrost degradation // Journal of Hydrology. – 2022. – Vol. 604. – Article 127203. DOI: 10.1016/j.jhydrol.2021.127203.
18. Готовцев С.П., Климовский И.В., Шепелев В.В. О важности организации геометрического мониторинга при подземном захоронении дренажных вод в мерзлую толщу // Природные ресурсы Арктики и Субарктики. – 2015. – № 3. – С. 37–41.
19. Distributed Temperature Sensing as a downhole tool in hydrogeology / V.F. Bense, T. Read, O. Bour, T. le Borgne, T. Coleman, S. Krause, A. Chalarin, M. Mondanos, F. Ciocca, J.S. Selker // Water Resour. Res. – 2016. – Vol. 52. DOI: 10.1002/2016WR018869.
20. Использование ММП для закачки дренажных вод коренных месторождений алмазов на примере участка «Ноябрьский» / А.М. Янников, С.А. Яникова, М.Ю. Овчинникова, А.Ю. Корепанов // Вестник Пермского университета. Геология. – 2021. – № 3. – С. 284–299.
21. Янников А.М. Перспективы использования многолетнемерзлых пород Далдынского кимберлитового поля для закачки дренажных вод трубок Зарница и Удачная // Геоэкология. Инженерная геология, гидрогеология, геокриология. – 2023. – № 2. – С. 43–55. DOI: 10.31857/S0869780923020108.

Информация об авторах

Алексей Михайлович Янников, кандидат геолого-минералогических наук, заместитель директора по научной работе Института «Якутнипроалмаз» АК «АЛРОСА» ПАО, Россия, 678170, г. Мирный, ул. Ленина, 39; YannikovAM@alrosa.ru, <http://orcid.org/0000-0002-2169-123X>

Алексей Юрьевич Корепанов, заведующий лабораторией горно-геологических проблем разработки месторождений Института «Якутнипроалмаз» АК «АЛРОСА» ПАО, Россия, 678170, г. Мирный, ул. Ленина, 39; KorepanovAYu@alrosa.ru, <https://orcid.org/0000-0002-3593-2524>

Агита Сергеевна Стручкова, заведующий сектором гидрогеологического и гидродинамического моделирования Института «Якутнипроалмаз» АК «АЛРОСА» ПАО, Россия, 678170, г. Мирный, ул. Ленина, 39; StruchkovaAS@alrosa.ru, <https://orcid.org/0000-0001-7835-6048>

Поступила в редакцию: 30.10.2023

Поступила после рецензирования: 11.03.2024

Принята к публикации: 03.09.2024

REFERENCES

1. Kolganov V.F., Akishev A.N., Drozdov A.V. *Mining and geological features of primary diamond deposits of Yakutia*. Mirny, Mirny Town Printing House, 2013. 568 p. (In Russ.)
2. Wigandt V.A. Experience in the construction and operation of reinjection of drainage water from the Mir quarry. *Gornyi Zhurnal*, 1994, no. 9, pp. 60–62. (In Russ.)
3. Drozdov A.V. *The burial of drainage brine in perennial rocks (on the example of cryolitozones of the Siberian platform)*. Irkutsk, IGTU Publ., 2007. 296 p. (In Russ.)
4. Drozdov A.V., Genzel G.N. Problems in operation of drainage water reinjection system at Mir pipe and open pit. *Geokologiya, inzhenernaya geologiya. Gidrogeologiya. Geokriologiya*, 2015, no. 4, pp. 304–316.
5. *Hydrogeoeological control at the landfills of industrial wastewater rolling (methodological guidance)*. Ed. by V.P. Ilchenko. Moscow, IRC Gazprom Publ., 2000. 122 p
6. Pouladi B., Bour O., Longuevergne L., De La Bernardie J., Simon N. Modelling borehole flows from Distributed Temperature Sensing data to monitor groundwater dynamics in fractured media. *Journal of Hydrology*, 2021, vol. 598, article 126450. DOI: 10.1016/j.jhydrol.2021.126450.
7. Capes D.C., Steelman C.M., Parker B.L. Hydrologic interpretation of seasonally dynamic ambient temperature profiles in sealed bedrock boreholes. *Journal of Hydrology*, 2018, vol. 567, pp. 133–148. DOI: <https://doi.org/10.1016/j.jhydrol.2018.10.005>
8. Rajabi M.M., Ataie-Ashtiani B., Simmons C.T. Model-data interaction in groundwater studies: Review of methods, applications and future directions. *Journal of Hydrology*, 2018, vol. 567, pp. 457–477. DOI: <https://doi.org/10.1016/j.jhydrol.2018.09.053>.
9. Basant R.A., Lynne B.Y., Ramsook R., Ryan G.A., Blake O.O., Utley J.E.P. Utilizing cores for characterising the temperature and permeability regimes in a litho-stratigraphic model of the Montserrat geothermal system, Montserrat (Lesser Antilles arc, West Indies). *Geothermics*, 2022, vol. 100, article 102341. DOI: 10.1016/j.geothermics.2021.102341.
10. Yannikov A.M. *Hydrogeology of the Daldyn Kimberlite field: Republic of Sakha (Yakutia)*. Mirnyi, ZYaNTS/YaNA Publ., 2023. 305 p. (In Russ.)
11. Drozdov A.V., Iost N.A., Lobanov V.V. *Cryohydrogeology of diamond deposits in Western Yakutia*. Irkutsk, IGTU Publ., 2008. 507 p. (In Russ.)
12. *Hydrogeology of the USSR. Vol. XX. Yakut ASSR*. Moscow, Nedra Publ., 1970. 384 p. (In Russ.)
13. Klimovskii I.V., Gotovtsev S.P. *Cryolithozone of the Yakut diamondiferous province*. Novosibirsk, Nauka Publ., 1994. 167 p. (In Russ.)
14. Yannikov A.M., Struchkova A.S., Korepanov A.Yu. Modeling hydrodynamic regime of the technogenic aquifer within the Noyabrskiy site of the Aikhal mine. *Earth sciences and subsoil use*. 2023, no. 46 (1), pp. 20–35. (In Russ.) DOI: <https://doi.org/10.21285/2686-9993-2023-46-1-20-35>
15. Alekseev S.V., Drozdov A.V., Drozdova T.I., Alekseeva L.P. The first experience of burying saline drainage waters of the Udachnaya pipe open pit in permafrost. *Kriosfera Zemli*, 2002, vol. VI, no. 2, pp. 61–65. (In Russ.)
16. Herut B., Starinsky A., Katz A., Bein A. The role of seawater freezing in the formation of subsurface brines. *Geochimica et Cosmochimica Acta*, 1990, vol. 54, Iss. 1, pp. 13–21. DOI: [https://doi.org/10.1016/0016-7037\(90\)90190-V](https://doi.org/10.1016/0016-7037(90)90190-V).
17. Han L., Menzel L. Hydrological variability in southern Siberia and the role of permafrost degradation. *Journal of Hydrology*, 2022, vol. 604, article 127203. DOI: 10.1016/j.jhydrol.2021.127203.
18. Gotovtsev S.P., Klimovsky I.V., Shepelev V.V. On the importance of organizing geometric monitoring during underground burial of drainage water in the frozen mass. *Arctic and Subarctic Natural*, 2015, no. 3, pp. 37–41. (In Russ.)
19. Bense V.F., Read T., Bour O., Le Borgne T., Coleman T., Krause S., Chalari A., Mondanos M., Ciocca F., Selker J.S. Distributed Temperature Sensing as a downhole tool in hydrogeology. *Water Resour. Res.*, 2016, vol. 52. DOI: 10.1002/2016WR018869.
20. Yannikov A.M., Yannikova S.A., Ovchinnikova M.Yu., Korepanov A.Yu. Using permafrost for pumping drainage water from primary diamond deposits on the example of the Noyabrskiy site (Aykhal mine). *Bulletin of Perm University. Geology*, 2021, no. 3, pp. 284–299. (In Russ.)
21. Yannikov A.M. Prospects for the use of perennemier-mowed rocks of the Daldynsky Kimberlite Field for pumping drainage water tubes Zarnitsa and Successful. *Geokologiya, inzhenernaya geologiya. Gidrogeologiya. Geokriologiya*, 2023, no. 2, pp. 43–55. (In Russ.)

Information about the authors

Alexey M. Yannikov, Cand. Sc., Deputy Director for Scientific Work, Yakutniproalmaz Institute of JSC ALROSA PJSC, 39, Lenin street, Mirny, 678170, Russian Federation. YannikovAM@alrosa.ru, <http://orcid.org/0000-0002-2169-123X>

Aleksey Yu. Korepanov, Head of the Laboratory of Mining and Geological Problems of Field Development, Institute "Yakutniproalmaz" AK "ALROSA" PJSC, 39, Lenin street, Mirny, 678170, Russian Federation. KorepanovA-Yu@alrosa.ru, <https://orcid.org/0000-0002-3593-2524>

Agita S. Struchkova, Head of the hydrogeological and hydrodynamic modeling sector of the Yakutniproalmaz Institute, ALROSA PJSC, 39, Lenin street, Mirny, 678170, Russian Federation. StruchkovaAS@alrosa.ru, <https://orcid.org/0000-0001-7835-6048>

Received: 30.10.2023

Revised: 11.03.2024

Accepted: 03.09.2024

УДК 551.4.03:711.4

DOI: 10.18799/24131830/2024/9/3915

Шифр специальности ВАК: 1.6.7

Геологические опасности при обосновании регламентов градостроительного развития

Е.Ю. Трацевская✉

Гомельский государственный университет имени Франциска Скорины, Беларусь, г. Гомель

✉ eltrats@mail.ru

Аннотация. Актуальность. Территориальное планирование городов обуславливает уменьшение или предупреждение возможных или существующих потерь населения, объектов хозяйства и окружающей природной среды от техноприродных опасностей разного генезиса. Эффективность планирования регламентов градостроительного развития зависит от степени обоснованности идентификации и прогнозов возникновения и эволюции опасных природных и техногенных процессов во времени и пространстве. Это в свою очередь определяется достоверностью наших представлений о закономерностях их формирования и регионального распространения. **Цель:** идентифицировать геологические опасности и предложить основные инженерно-геологические ограничения при градостроительном планировании на примере г. Гомеля. **Объекты:** природно-техногенная система города Гомеля. **Методы:** системный подход при анализе закономерностей формирования опасных природных и техноприродных процессов на территории города; численное моделирование геофильтрационных и геомиграционных процессов на базе геофильтрационной модели «GOMEL». **Результаты.** Установлены наиболее характерные опасные природные и техноприродные процессы на примере г. Гомеля. Выделены приоритетные для введения планировочных ограничений – тектоническая обстановка; техногенное подтопление. Отдельно рассмотрены грунтовые условия, как один из факторов влияния на осадки естественных и искусственных оснований под действием нагрузок от гражданских и промышленных зданий и сооружений. Выявлено наличие дизъюнктивных, а также пликативных в виде флексур, разновозрастных и разномасштабных дислокаций, формирующих блоковую структуру верхней части земной коры города. Показано, что с точки зрения устойчивости инженерных сооружений опасность представляют абсолютные значения скоростей длиннопериодических однонаправленных смещений блоков при длительной эксплуатации сооружений, расположенных в межблоковых активных зонах. В то же время короткопериодические разнонаправленные движения в активных геодинамических зонах сочленения блоков обуславливают изменение наклона и изгиба оснований сооружений. Приведены инженерно-геологические особенности наиболее распространенных поверхностных отложений: терригенной сероцветной формации палеогена; ледниковой, перигляциальной и внеледниковой формаций антропогена и их фациально-генетических комплексов. Определены потенциальные природные и техноприродные опасности, связанные с отмеченными отложениями. Показаны причины и механизмы формирования техногенного подтопления города, а также природа снижения показателей деформационных свойств моренной супеси при техногенном увеличении влажности. Сделан вывод о том, что при установлении регламентов землепользования для города, как правило, не могут приниматься общие меры, как для всей его территории, так и для определенных стадий строительной деятельности. Приведены соответствующие ограничения пользования недрами.

Ключевые слова: регламенты, урбанистическая геология, геологические опасности, структурно-тектонические условия, грунты, осадка, подтопление

Для цитирования: Трацевская Е.Ю. Геологические опасности при обосновании регламентов градостроительного развития // Известия Томского политехнического университета. Инжиниринг георесурсов. – 2024. – Т. 335. – № 9. – С. 73–83. DOI: 10.18799/24131830/2024/9/3915

UDC 551.4.03:711.4

DOI: 10.18799/24131830/2024/9/3915

Geological hazards when justifying the regulations of urban development

E.Yu. Tratsevskaya✉

Francysk Skaryna Gomel State University, Gomel, Belarus

✉eltrats@mail.ru

Abstract. Relevance. Territorial planning of cities determines the reduction or prevention of possible or existing losses of the population, economic facilities and the environment from technogenic-natural hazards of different genesis. The effectiveness of planning regulations for urban development depends on the degree of validity of identification and forecasts of the occurrence and evolution of hazardous natural and technogenic processes in time and space. This, in its turn, is determined by the reliability of our ideas about the patterns of their formation and regional distribution. **Aim.** To identify geological hazards and propose the main engineering and geological constraints in urban planning on the example of Gomel. **Objects.** Natural and technical system "geological environment – technogenic impacts – hazardous natural and technoprirodnye processes". **Methods.** Systematic approach to the analysis of patterns of formation of hazardous natural and technoprirodnye processes in the city; numerical modeling of geofiltration and geomigration processes based on the geofiltration model "GOMEL". **Results.** The most characteristic dangerous natural and technogenic-natural processes have been established on the example of the city of Gomel. Priority areas for the introduction of planning restrictions: tectonic situation; man-made flooding, were identified. Soil conditions are considered separately as one of the factors effecting the precipitation of natural and artificial bases under the influence of loads from civil and industrial buildings and structures. The authors have revealed the presence of disjunctive, as well as plicative in the form of flexures, age-varying and multi-scale dislocations forming the block structure of the upper part of the earth's crust of the city. It is shown that from the point of view of the stability of engineering structures, the absolute values of the velocities of long-period unidirectional block displacements are dangerous during long-term operation of structures located in interblock active zones. At the same time, short-period multidirectional movements in the active geodynamic zones of the articulation of blocks cause a change in the slope and bending of the foundations of structures. The paper introduces the engineering-geological features of the most common surface deposits: the terrigenous gray-colored formation of the Paleogene; glacial, periglacial and extraglacial formations of anthropogenic origin and their facies-genetic complexes. The authors identified the potential natural and technological hazards associated with the marked deposits. The paper demonstrates the causes and mechanisms of the formation of technogenic flooding of the city, as well as the genesis of the decrease in the deformation properties of moraine sandy loam with a technogenic increase in humidity. It is concluded that when establishing land use regulations for a city, as a rule, general measures cannot be taken, both for its entire territory and for certain stages of construction activity. The paper introduces the corresponding restrictions on the use of subsoil.

Keywords: regulations, urban geology, geological hazards, structural and tectonic conditions, soils, sediment, flooding

For citation: Tratsevskaya E.Y. Geological hazards when justifying the regulations of urban development. *Bulletin of the Tomsk Polytechnic University. Geo Assets Engineering*, 2024, vol. 335, no. 9, pp. 73–83. DOI: 10.18799/24131830/2024/9/3915

Введение

Геологическая среда г. Гомеля выбрана в качестве объекта исследования, так как это один из крупнейших городов Беларуси, административный центр Гомельской области. Он расположен в юго-восточной части республики на реке Сож, площадь составляет 139 км², территория вытянута с севера на юг примерно на 17 км. Город является важным промышленным центром с населением 510 тысяч человек.

Климат Гомеля, как и всей республики, умеренно континентальный, природные условия характеризуются значительным количеством атмосферных осадков (годовая сумма – 610 мм). Около 70 % осадков выпадает в теплый период года с апреля по

октябрь. Среднегодовая температура воздуха +6,2 °С. Максимальная мощность деятельного слоя составляет 1,47 м.

Рельеф города и его ближайших окрестностей представлен сильно размытой пологоволнистой водно-ледниковой равниной, двумя надпойменными террасами реки Сож аккумулятивными по левобережью и эрозионно-аккумулятивными на правом борту долины, а также низменной аллювиальной равниной с пойменным микрорельефом левобережья (рис. 1). Общий уклон поверхности – с севера на юг. Самая высокая точка – 144 м, самая низкая – урез Сожа – 115 м над уровнем моря. Относительные превышения в пределах города 10–15 м.

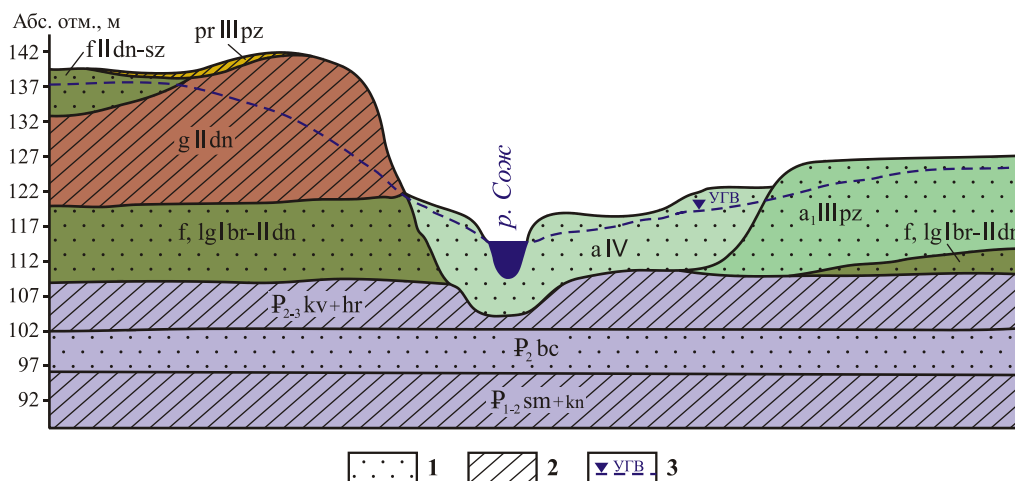


Рис. 1. Схематический разрез верхних горизонтов платформенного чехла территории г. Гомеля: 1) водопроницаемые породы, 2) слабопроницаемые породы 3) уровень грунтовых вод

Fig. 1. Schematic section of the upper horizons of the platform cover of the territory of Gomel: 1) water-permeable rocks, 2) weakly permeable rocks 3) groundwater level

Поверхностные воды представлены реками, озерами и прудами. Русло р. Сож в пределах городской черты имеет ширину 200–300 м, средняя глубина 1–3 м. Коэффициент меандрирования составляет 1,03–2,22. У восточного края городской черты слева в Сож впадает река Ипуть.

На состояние геологической среды г. Гомеля, как и любого другого города, оказывают влияние десятки видов природных и природно-техногенных процессов. Геологические опасности связаны, в первую очередь, с наличием разломов, проявляющих активность на современной этапе; оврагами, болотами, заболоченными и пойменными участками, в т. ч. погребенными антропогенными отложениями; развиты процессы суффозии, пльвуны; склоны и откосы характеризуются неустойчивым состоянием.

Характер техногенного воздействия на естественную среду во многом определяется функциональным районированием городской территории. Планировочную структуру г. Гомеля формируют четыре основные функциональные зоны: жилая, общественная, производственная и ландшафтно-рекреационная, с присущими им источниками и типами техногенных воздействий. Антропогенное влияние приводит к изменению хода природных процессов, обуславливает возникновение новых инженерно-геологических процессов, которые вызывают закономерные изменения состава, состояния и свойств определенных элементов геологической среды, что, в свою очередь, отражается в градостроительной ценности территории.

Состояние проблемы

Обострение геоэкологических проблем городов, приходящееся на середину прошлого века, привело

к тому, что урбанистическая геология в 1960-е гг. оформилась как самостоятельная дисциплина [1, 2]. Предметом ее изучения являются взаимосвязи между человеком и геологической средой в пределах урбанизированных территорий и возникающие в результате этих взаимосвязей техноприродные процессы.

Изучением отдельных аспектов инженерной геологии, имеющих непосредственное отношение к проблемам геологии городов, с середины прошлого века занимались многие ученые: И.В. Попов, Г.С. Золотарев, Л.Д. Белый, Г.А. Голодковская и др. В то время были созданы теоретические и методологические основы инженерно-геологического (генетико-морфологического и оценочного) районирования, в том числе и городских территорий. В конце прошлого – начале нынешнего столетия при районировании стали принимать во внимание устойчивость геологической среды и ее емкость. Была разработана методика риск-анализа, базирующаяся на таких понятиях, как уязвимость городской среды, геологические опасности, прогнозируемый ущерб (В.И. Осипов, В.А. Королев, Г.А. Голодковская, А.Л. Рагозина, Е.С. Дзекцер, Т.Я. Емельянова, Л.А. Строкова Л.А. и др.).

Проблема адаптации инженерно-геологического районирования городских территорий к современным требованиям широко обсуждается в научной литературе [2–25]. Как подчеркивается в статье Осипова с соавторами: «В настоящее время за рубежом общепризнано, что наиболее эффективным экономическим инструментом для обеспечения устойчивого развития городов и управления рисками является территориальное планирование, согласованное с картами природных опасностей, где указаны запреты или ограничения к освоению тер-

риторий того или иного назначения. ... Эта проблема на количественном уровне ... не решена еще нигде в мире» [1].

Прикладной аспект изучения геологии городов отражается в установлении регламентов градостроительного развития и использования территории нормативными документами. Так, например, в Беларуси генеральными планами развития городских населенных пунктов предусматривается составление схем планировочных ограничений. К имеющим ограничения относятся территории, неблагоприятные для строительства, в том числе по инженерно-геологическим условиям (состояние грунтов, затопление и подтопление грунтовыми водами, активные овраги, просадки, заторфованность и т. д.).

Геологические опасности

Для введения планировочных ограничений из всех перечисленных выше опасных техноприродных процессов и явлений актуальными представляются тектоническая обстановка; техногенное подтопление, а также грунтовые условия как один из факторов влияния на осадки естественных и искусственных оснований под действием нагрузок от гражданских и промышленных зданий и сооружений.

Структурно-тектонические условия

Современное состояние геологической среды, обусловленное динамическим взаимодействием разновозрастных и разномасштабных тектонических структур, существенно влияет на инженерно-геологические условия урбанизированных территорий. Особую роль при этом играют активные геологические разломы, по которым происходили и происходят в настоящее время горизонтальные и вертикальные перемещения блоков. Эти движения создают неустойчивые зоны в геологической среде, являющиеся неблагоприятными для строительства инженерных сооружений.

Гомель располагается на западной периклинали Воронежской антеклизы Русской плиты. Породы, сформировавшиеся во время киммерийско-альпийского этапа, образуют наклоненную на юг моноклиаль северного крыла Украинской синеклизы. Все установленные на его территории разрывные нарушения были сформированы и развивались до раннего триаса [26]. Возможно, некоторые из дизъюнктивов сохраняли или возобновляли тектоническую активность и в последующие этапы платформенного развития вплоть до современной эпохи. Подвижки пород по сместителям наблюдаются на глубинах более 350 м, поэтому разломы кристаллического фундамента и нижней части платформенного чехла оказывают пассивное влияние на инженерно-геологические условия. Они обуславливают формирование трещинной зоны

платформенного чехла, а также новейших тектонических структур.

В результате выполненных нами исследований в пределах г. Гомеля и его окрестностей выявлено наличие дизъюнктивных и пликтивных в виде флексур разновозрастных и разномасштабных дислокаций (геоактивных зон), формирующих блоковую структуру верхней части земной коры, выделено 10 блоков (рис. 2) [26].

С точки зрения устойчивости инженерных сооружений опасность представляют, во-первых, абсолютные значения скоростей длиннопериодических однонаправленных смещений блоков при длительной эксплуатации сооружений, расположенных в межблоковых активных зонах. Во-вторых, короткопериодические разнонаправленные движения в активных геодинамических зонах сочленения блоков (смыкающие крылья флексур), обуславливающие изменение наклона и изгиба оснований сооружений.

Проведенные исследования позволяют сделать вывод о потенциальной опасности современного динамического состояния геологической среды г. Гомеля относительно целостности инженерных сооружений в период, определённый для срока их эксплуатации.

Осадки грунтов естественных оснований, формирующиеся за счет нагрузок от гражданских и промышленных зданий и сооружений

В сферу влияния инженерных сооружений попадают породы самой верхней части киммерийско-альпийского структурного комплекса, принадлежащие терригенной сероцветной формации палеогена и гравийно-песчано-глинистой ледниковой формации антропогена. Отложения неогеновой системы на территории Гомеля не установлены.

В процессе инженерно-геологическом районировании нами выделено 2 области и 9 инженерно-геологических районов. При установлении регламентов в первую очередь обращают на себя внимание районы, занимающие значительные площади и в большей мере определяющие инженерно-геологический облик территории. К ним относятся те из них, в которых с поверхности залегают моренные супеси и суглинки ледникового фациально-генетического комплекса днепровского горизонта (в рельефе – моренная равнина); районы, сложенные с поверхности днепровско-сожскими флювиогляциальными песками (в рельефе – зандровая равнина) и современными аллювиальными отложениями пойм (внеледниковая формация).

Терригенная сероцветная формация палеогена. Отложения киевской свиты эоцена (Р₂kv) представлены алевролитами, песками глинистыми, алевролитами, глинами; иногда песками кварцевыми, в раз-

личной степени глауконитовыми. Отложения эоцен-олигоцена (харьковская свита – P_2^3 – P_3^1 hr) преимущественно песчаные. Кровля последних вскрыта отдельными скважинами на глубинах от 2,0 до 25,0 м; максимальная вскрытая мощность – 19,8 м.

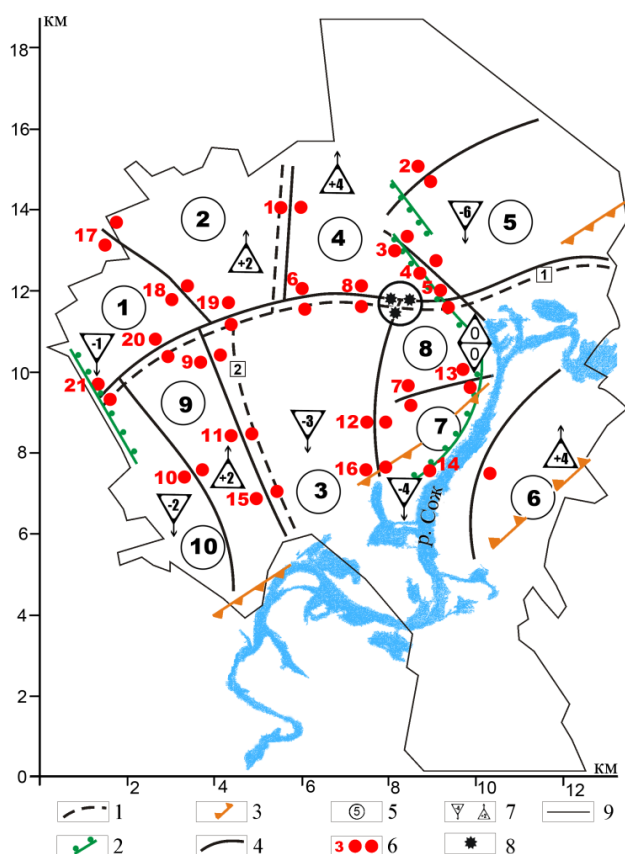


Рис. 2. Карта-схема расположения геоактивных зон г. Гомеля: 1) тектонические нарушения, установленные по геологическим данным; 2) выраженная в рельефе кольцевая структура; 3) региональная геоактивная зона; 4) границы блоков; 5) номера блоков; 6) смежные пары деформационных знаков; 7) вертикальные скорости и направления движения блоков; 8) нивелирные знаки локальных исследований; 9) граница города

Fig. 2. Map-layout of the geo-active zones of Gomel: 1) tectonic disturbances established by geological data; 2) ring structure expressed in relief; 3) regional geo-active zone; 4) block boundaries; 5) block numbers; 6) adjacent pairs of deformation signs; 7) vertical speeds and directions of movement of blocks; 8) leveling signs of local research; 9) city border

Плотность и состояние морских глинистых пород различны. Суглинки при естественной влажности $\omega=15\%$ имеют плотность грунта $\rho=1,52\text{ г/см}^3$, коэффициент пористости $e=0,96$. Они относятся к сильно деформируемым грунтам, модуль общих деформаций $E=2,5\text{--}4,9\text{ МПа}$ (компрессионные ис-

пытания при давлении $P=0,1\text{--}0,2\text{ МПа}$). Удельное сцепление $C=0,14\text{ МПа}$, угол внутреннего трения $\varphi=14^\circ$.

Супеси характеризуются естественной влажностью $\omega=20\text{--}35\%$, плотностью $\rho=1,52\text{ г/см}^3$, коэффициентом пористости $e=0,96$. Они относятся к среднесжимаемым грунтам – $E=12\text{--}16\text{ МПа}$ (штамповые испытания при давлении $P=0,1\text{--}0,3\text{ МПа}$). Удельное сцепление $C=0,022\text{--}0,038\text{ МПа}$, угол внутреннего трения $\varphi=24\text{--}27^\circ$.

С перечисленными отложениями связан целый ряд геологических опасностей. Песчаные породы подвержены механической суффозии; при критических градиентах фильтрации, как правило, формируют ложные плывуны. Из-за повышенного содержания пылеватых частиц (50 % и более) эти грунты при механическом воздействии и дополнительном увлажнении способны терять связность (размокать) и оплывать [3].

Ледниковая формация. Ледниковый фациально-генетический комплекс представлен моренными глинистыми породами (преимущественно супесями) днепровского подгоризонта (gII_d) припятского горизонта (gII_{pr}) (калужский и горкинский подгоризонты среднерусского горизонта). Мощность отложений от нескольких до 10–15 м.

В общем для моренных грунтов в естественном залегании характерны невысокие значения влажности $\omega=9,7\text{--}10,1\%$, повышенная плотность $\rho=2,07\text{--}2,25\text{ г/см}^3$, коэффициент пористости $e=0,32\text{--}0,44$. Значения модуля общих деформаций E , установленные штамповыми испытаниями в интервале вертикального давления, например, $P=0,1\text{--}0,3\text{ МПа}$, изменяются от 10 до 42 МПа в зависимости от консистенции грунта; удельное сцепление C – от 0,023 до 0,025 МПа, угол внутреннего трения $\varphi=26\text{--}36^\circ$.

В естественном залегании, как правило, ледниковые отложения являются довольно надежным основанием. Но в современных условиях, когда в геологической среде города имеется тенденция к развитию техногенного подтопления и, как следствие, к увеличению влажности грунтов, необходимо учитывать снижение их несущей способности. Из глинистых грунтов различных геолого-генетических комплексов именно ледниковые сильнее всего реагируют на увеличение влажности, причем тем больше, чем меньше их естественная влажность и больше плотность сложения. Следует отметить, что увеличение влажности моренных супесей и суглинков до 10–25 % является причиной стремительного увеличения их коррозионной активности. В деятельном слое они предрасположены к морозному пучению. При вскрытии строительными котлованами опасности могут быть обуслов-

лены легкой размываемостью глинистых разностей и их подверженности линейной эрозии.

Флювиогляциальный фациально-генетический комплекс представлен в объеме нерасчлененных березинско-припятских (fIbr-pr) (окско-среднерусских) и днепровско-сожских (fId-sz) (горкинско-московских) образований. Как правило, это пески различного гранулометрического состава, реже – глинистые или грубообломочные грунты. Вскрытая мощность до 21,30 м.

Флювиогляциальные пески по своим свойствам мало отличаются от других песков, образовавшихся в субэральных перигляциальных или внеледниковых обстановках рассматриваемой территории. Им характерна только несколько большая плотность. Естественная влажность ω колеблется в основном в небольших пределах – 3,4–6,0 %, плотность изменяется от 1,69 до 1,76 г/см³; коэффициент пористости $e=0,60–0,65$. Модуль общих деформаций $E=28\div49$ МПа (штамповые испытания, давление 0,1–0,3 МПа). Значения удельного сцепления C варьируют в пределах 0,002–0,005 МПа (консолидированно-дренированный плоский срез), углы внутреннего трения φ изменяются от 33 до 38°.

В толще флювиогляциальных песков местами залегают прослои и линзы глинистых грунтов, которые характеризуются несколько худшими показателями деформационных свойств по сравнению с песками, – значения модуля общих деформаций E принимают значения, например, у супеси от 8,0 до 21 МПа. Также значительно снижены значения угла внутреннего трения до 18–36°. Значения удельного сцепления характеризуются относительно повышенными показателями – C изменяется в пределах 0,008–0,048 МПа.

Для массивов флювиогляциальных грунтов характерна сингенетическая неоднородность, которая в большей степени определяет потенциальные опасности для строительства и надежной эксплуатации различных инженерных сооружений. При определенных условиях несвязные разности способны формировать псевдоплывуны.

Перигляциальная (поозерская – Пpz), (валдайская) и *внеледниковая* (голоцен IVhl) *формации*. Покровные образования. Верхняя часть отложений днепровской морены и днепровско-сожского флювиогляциала преобразуются под воздействием гипергенных процессов, в результате чего формируется маломощная (до 1,5 м) толща неоднородных песков палево-желтых, пылеватых, супесей и суглинков. В покровных отложениях преобладают супеси легкие, пылеватые, лессовидные. В их гранулометрическом составе на долю глинистых частиц (диаметр меньше 0,005 мм) приходится от 6,0 до 10,8 %, алевритовых – 20–62 %, песчаные частицы составляют от 31,6 до 70,7 %. Сравнительно

большое содержание алевритовых частиц и незначительное глинистых обуславливает водонеустойчивость данных грунтов. Показатели естественной влажности ω колеблются в пределах 0,06–0,20; плотности ρ – от 1,78 до 2,17 г/см³; коэффициента пористости e – от 0,32 до 0,99. Значения модуля общих деформаций E варьирует в пределах 5,9–25 МПа (штамповые испытания при вертикальном давлении $P=0,25\div0,30$ МПа), удельное сцепление C , определенное методом консолидированно-дренированного плоского среза, достигает значений 0,047 МПа, а угол внутреннего трения φ – 31°.

С покровными отложениями на территории Гомеля связано развитие целого спектра экзогенных геологических и инженерно-геологических процессов и явлений – эрозионных, суффозионно-эрозионных, оползневых и т. д. При оттаивании покровные отложения нередко разжижаются и теряют несущую способность. Такие особенности необходимо учитывать при проектировании различных сооружений, имеющих небольшой объем подземной части, в первую очередь – инженерных коммуникаций, местных автомобильных дорог и т. п.

Из всего комплекса нерасчлененных аллювиальных, озерных, озерно-аллювиальных, болотных, эоловых, пролювиальных, делювиальных отложений с точки зрения формирования геологических опасностей обращают на себя внимания породы пойменной и старичной фаций аллювия. Свойства пойменных и старичных отложений формируются в обстановках позднего диагенеза прогрессивного литогенеза, т. е. их уплотнение продолжается, состояние равновесия и консолидация еще не достигнуты, что является причиной неустойчивости. В отложениях преобладают супеси и суглинки, местами заторфованные, пески от пылеватых до крупных часто заиленные, сапропели и торфы. Органическое вещество представлено растительным детритом различной величины и степени разложения, тонко рассеянным коллоидным веществом, гумусом. Вскрытая мощность пород до 17 м.

Формирование геологических опасностей обусловлено чрезвычайно сильной незакономерной неоднородностью отложений, выраженной на очень небольших расстояниях, как по простиранию, так и по глубине, а также невыдержанностью литологических границ. Грунты характеризуются сравнительно высокими показателями влажности ($\omega=17,0–24,2$ %), влагоемкости (влажность верхнего предела текучести $W_L=22,7–25,3$ %), пористости ($e=0,57–0,76$) и пониженной плотностью; неустойчивой скрыто-мягкопластичной или даже скрыто-текучей консистенцией связных грунтов; а также анизотропией свойств, обусловленной слоистостью. Они имеют малое сопротивление сдвигу ($C=0,01$ МПа, $\varphi=30^\circ$), отдельные разности сильно

неравномерно и длительно сжимаемы. Значения модуля общих деформаций E составляют 12–14 МПа. При динамических воздействиях могут проявляться тиксотропные явления, формироваться плывуны. Наличие органики обуславливает агрессивные свойства грунтовых вод.

Техногенное подтопление

Одним из наиболее опасных процессов, развивающихся в г. Гомеле, представляется техногенное подтопление, причиной которого является разбалансировка составляющих элементов гидросферы.

Механизм формирования подтопления в границах города можно рассмотреть на примере основных типичных схем увлажнения пород зоны аэрации при различных условиях движения фронта (границы) промачивания.

Первая схема – образование водных куполов. Толща слабопроницаемых пород мощностью до 27 м с определенной упругой емкостью подстилается водонасыщенными породами. Уровень грунтовых вод (УГВ) залегает в слабопроницаемых породах на значительных глубинах – более 5, иногда более 12–15 м. Фронт промачивания перемещается сверху вниз, влагоперенос обуславливает увеличение влажности грунтов. Увлажнение в плане носит неравномерный характер и определяется расположением источников инфильтрации (водонесущие коммуникации, дающие систематические утечки). Под источниками инфильтрации на УГВ формируются поднимающиеся купола грунтовых вод, которые приводят к неравномерному в плане обводнению пород, но уже снизу вверх. По результатам проведенного моделирования [27], максимальная высота купола относительно первоначального положения УГВ составляет 3,0 м и достигается за 10-летний срок, после чего стабилизируется. Радиус растекания за это время достигнет 550 м. Растекание происходит медленно, поэтому даже через 30 лет купола остаются хорошо выраженными. При близком расположении источников инфильтрации в течение года купола начинают смыкаться. Наиболее интенсивно подъем происходит в первые 5 лет и затем затухает, приближаясь к стационарному режиму.

Для моренных супесей характерны коагуляционные и переходные межчастичные контакты. Важной особенностью переходных контактов является их неустойчивость по отношению к воде, т. е. способность гидратироваться и переходить в коагуляционные контакты при снятии внешнего давления и увлажнения системы. Моренные отложения испытали большую ледниковую нагрузку (8–9 МПа), что привело к утоньшению и последующему прорыву гидратной оболочки глинистых частиц с образованием специфических контактов переходного типа за счет ионно-электростатических взаимодействий

между частицами. При снятии внешнего давления и (или) увлажнении системы, вызванных таянием ледника или другими, в том числе техногенными, причинами, контакты переходят в менее прочные коагуляционные (регрессивный литогенез). В связи с этим при подтоплении деформируемость грунтов увеличивается по некоторым данным в 1,5–2,0 и даже до 5 раз, удельное сцепление C может уменьшиться в 2–2,5 раза. По нашим данным, для моренных супесей при увеличении влажности до полного водонасыщения значения модуля E могут уменьшиться в 2,87 раза. Неравномерный характер обводнения в плане приводит к неравномерной деформации пород, что представляет собой опасность для строящихся или уже построенных инженерных объектов из-за возможности возникновения неравномерности осадок их различных частей. Такой механизм развития процесса подтопления в основном имеет место в центральной и северной частях города в пределах среднечетвертичной моренной равнины.

Вторая схема – фронтальное движение грунтовых вод. Толща проницаемых пород мощностью до 12 м, характеризующаяся гравитационной емкостью, подстилается слабопроницаемыми породами. Грунтовые воды находятся на глубине 2–3 м от поверхности земли. Фронт просачивания перемещается сверху вниз. Как и в первом случае, под источниками инфильтрации формируются поднимающиеся купола грунтовых вод. Но они, в отличие от первой схемы, имеют небольшую высоту – 0,1–0,2 м, гораздо быстрее достигают стационарного положения по высоте (за 1 год). Максимальный радиус растекания составляет 110 м и стабилизируется через 5–10 лет. Фронт обводнения перемещается снизу вверх, но относительно равномерно, и деформации пород в этом случае являются более равномерными и поэтому менее опасными. Таким образом происходит подтопление в границах залегания дисперсных, главным образом несвязных грунтов потоково-водной (флювиальной) парагенетической группы средне-, верхнечетвертичных и современных отложений, распространенных в западной, восточной и южной частях города.

Глубина залегания уровня грунтовых вод здесь сопоставима с глубиной заложения фундаментов и/или активной зоной инженерных сооружений, поэтому подтопление может спровоцировать затопление заглубленных помещений, в результате которого появляется сырость и грибковые образования на стенах; исключается хранение в подвалах имущества и пищевых продуктов; создается благоприятная среда для развития комаров, заболевания людей; резко осложняются условия содержания и ремонта систем водо-, электро- и газоснабжения, ускоряется их износ.

Появление и развитие процесса подтопления, как известно, обусловлено целым рядом причин.

Во-первых, это дополнительное инфильтрационное питание грунтовых вод из-за систематических и аварийных утечек воды из водонесущих коммуникаций. Самыми важными мероприятиями в этом случае является исключение утечек и хорошо организованный отвод дождевых вод, что решается организацией мониторинга за сохранностью подземных коммуникаций (внешних, внутренних, а также в местах их ввода) (СТО 36551 501-008-2007) или расчетом нормируемых потерь.

Во-вторых, нарушение условий дренирования территории и подземного стока. В этом случае регламенты должны определяться как для водосборных площадей естественных дренирующих систем, так и для зон влияния инженерных сооружений.

Регламенты недропользования при градостроительном развитии

Градостроительные регламенты являются нормативной сферой управления процессом городского развития, застройкой и использованием территорий. Они направлены на обоснование безопасного развития городских территорий в социальных, экономических, экологических аспектах и в конечном итоге на повышение их инвестиционной привлекательности. Регламенты недропользования городских территорий в разной степени имеют свое отражение в карте планировочных ограничений генерального плана города, оценочном зонировании при составлении кадастровой карты, схемы инженерно-геологического районирования для строительства, градостроительном паспорте земельного участка и т. п.

Основой для выработки регламентов использования городских недр является предрасположенность геологической среды до определенной глубины к активизации геологических и инженерно-геологических процессов и загрязнению подземных вод в результате хозяйственной деятельности человека. Как было показано выше, опасные природные и техноприродные процессы определяются комплексом взаимосвязанных причин. Поэтому регламенты недропользования должны носить системный характер, т. е. должна быть разработана система правил использования городской территории на каждом этапе строительной деятельности, определенном, например, в СН 1.02.01-2019. Причем на стадии инженерно-геологической рекогносцировки (разработка предпроектной документации) и съемки (разработка архитектурного проекта) приоритетными являются природные условия, а на стадии разработки строительного проекта и на всех последующих стадиях в период строительства и эксплуатации объекта техногенные факторы начинают контролировать природные.

При разработке документации любого этапа строительных работ важно учитывать, что регламенты землепользования необходимо предусматривать для каждого выделенного инженерно-геологического района. Если какая-либо рассматриваемая из намеченных площадок строительства располагается в нескольких инженерно-геологических районах, то и регламенты землепользования для этих районов могут быть различными. То есть при установлении регламентов землепользования для города, как правило, не могут приниматься общие меры, как для всей его территории, так и для определенных стадий производства строительных работ.

На стадии разработки предпроектной документации и архитектурного проекта при принятии планировочных решений необходимо учитывать влияние геоактивных зон с точки зрения рационального размещения инженерных сооружений, устойчивости их оснований.

Профилактические и защитные мероприятия от техногенного подтопления подробно и всесторонне рассмотрены в научной и нормативной литературе. Следует подчеркнуть, что важным условием эффективности их применения является учет инженерно-геологической обстановки формирования подтопления, а также понимание того, что является объектом защиты.

При разработке строительного проекта необходимо учитывать возможное присутствие в моренных глинистых грунтах внутриморенных водоносных песчаных прослоев, содержащих напорные воды, и линз слабых мягких глин и суглинков с относительно более низкими прочностными и деформационными свойствами, а также склонность отложений к морозному пучению.

При размещении строительной площадки на современных аллювиальных отложениях пойм нужно иметь в виду, что грунты характеризуются чрезвычайно сильной незакономерной неоднородностью, выраженной на очень небольших расстояниях, как по простирацию, так и по глубине, а также неустойчивостью литологических границ. Кроме того, отдельные разности сильно неравномерно и длительно сжимаемы, при динамических воздействиях могут проявляться тиксотропные явления и формироваться плавунуны, а наличие органики обуславливает агрессивные свойства грунтовых вод.

Во время строительства при вскрытии котлованами песчаных грунтов палеогена и внутриморенных водоносных песчаных прослоев при высоких гидравлических градиентах могут формироваться суффозия и ложные плавунуны, песчано-глинистые грунты палеогена могут размокать и оплывать.

При планировании застройки на покровных отложениях не следует допускать перерывов в

устройстве оснований и возведении фундаментов, т. к. грунты склонны к снижению прочности и переходу в плавунное состояние в процессе их преобразования в открытых котлованах.

В период эксплуатации объекта нужно иметь в виду, что при техногенном подтоплении глинистых моренных грунтов ухудшаются показатели их механических свойств. В случае точечных утечек из внутренних сетей здания уменьшение модуля деформации в отдельных локальных участках основания может привести к интенсивному развитию осадок, увеличению их неравномерности в контурах здания и, следовательно, к развитию поврежденных в несущих конструкциях.

Регулирование русел рек, расчистка и углубление водоемов, оврагов, мелких рек и ручьев зандровой равнины позволяют увеличить их дренажную способность и таким образом понизить уровни грунтовых вод и, соответственно, опасность подтопления.

Заключение

Правила землепользования городов должны носить системный характер и, как правило, не могут предусматривать общие меры, как для всей территории, так и для определенных стадий производства строительных работ. При принятии планировочных решений на стадиях предпроектной документации и архитектурного проекта приоритетными являются природные условия, а на стадиях разработки строительного проекта, в период строительства и эксплуатации объекта первостепенное значение приобретают техногенные факторы.

Комплексный подход к идентификации геологических опасностей (тектонической обстановки, техногенного подтопления, грунтовых условий) и соотношение их с видами инженерно-геологических исследований позволили определить регламенты недропользования при градостроительном развитии на примере г. Гомеля.

СПИСОК ЛИТЕРАТУРЫ

- Осипов В.И., Еремина О.Н., Козлякова И.В. Оценка экзогенных опасностей и геологического риска на урбанизированных территориях (обзор зарубежного опыта) // *Геозкология. Инженерная геология. Гидрогеология. Геоэкология*. – 2017. – № 3. – С. 3–15.
- Culshaw M.G., Price S.J. The 2010 Hans Cloos Lecture. The contribution of urban geology to the development, regeneration and conservation of cities // *Bulletin of Engineering Geology and the Environment*. – 2010. – Vol. 70. – № 3. – P. 333–376.
- Бурова В.Н. Основные принципы оценки риска урбанизированных территорий // *Геозкология. Инженерная геология. Гидрогеология. Геоэкология*. – 2020. – № 5. – С. 78–88.
- Land subsidence of Jakarta (Indonesia) and its relation with urban development / H.Z. Abidin, H. Andreas, I. Gumilar, Y. Fukuda, Y.E. Pohan, T. Deguchi // *Natural Hazards*. – 2011. – Vol. 59 (3). – P. 1–19. DOI: 10.1007/s1 1069-011-9869-9
- De Mulder E.F.J., Pereira J.J. Earth Science for the city // *Engineering geology for tomorrow's cities*. Geological Society / Eds. M.G. Culshaw, H.J. Reeves, I. Jefferson, T.W. Spink. London, Engineering Geology Special Publications. – 2009. – Vol. 22. – P. 25–31. DOI: 10.1144/EGSP22.2
- Lewis S.L., Maslin M.A. Geological evidence for the Anthropocene // *Science*. – 2015. – Vol. 349. – Iss. 6245. – P. 246–247. DOI: <https://doi.org/10.1126/science.349.6245.246-b>
- Marker B.R. Urban planning: the geoscience input // *Developments in Engineering. Geology Geological Society* / Eds. M.J. Eggers, J.S. Griffiths et al. – London: Engineering Geology Special Publication. – 2016. – Vol. 27. – P. 35–43. DOI: <https://doi.org/10.1144/EGSP27.3>
- Mücella Ates. The role of smart urban solutions on the way to smart territories: smart solutions to the problems of urbanization // *Information Technology and Communication Authority*. – Turkey, 2020. – P. 18. DOI: 10.4018/978-1-7998-2097-0.ch001
- Urban futures: the sustainable management of the ground beneath cities / S.J. Price, J.R. Ford, S.D.G. Campbell, I. Jefferson // *Developments in Engineering Geology. Geological Society* / Eds. M.J. Eggers, J.S. Griffiths et al. – London: Engineering Geology Special Publication, 2016. – Vol. 27. – P. 19–33. DOI: 10.1144/EGSP27.2
- Waltham T. Sinking cities – Feature // *Geology Today*. – 2002. – Vol. 18 (3). – P. 95–100. DOI: <https://doi.org/10.1046/j.1365-2451.2002.00341>
- Голодковская Г.А., Елисеев Ю.Б. Геологическая среда промышленных регионов. – М.: Недра, 1989. – 219 с.
- Емельянова Т.Я., Строкова Л.А. О принципах и методике районирования территории по устойчивости геологической среды к техногенному воздействию (на примере Томского Приобья) // *Геозкология*. – 1999. – № 2. – С. 164–171.
- Заиканов В.Г., Минакова Т.Б., Булдакова Е.В. Геоэкологические процессы в городе и оценка их опасности // *Геозкология. Инженерная геология. Гидрогеология. Геоэкология*. – 2022. – № 3. – С. 82–96.
- Геоэкологические исследования и оценка урбанизированных территорий / В.Г. Заиканов, Т.Б. Минакова, Н.С. Просунцова, Е.Б. Смирнова, Т.Н. Жигарева и др. // *Геозкология*. – 2000. – № 5. – С. 410–421.
- Кофф Г.Л., Минакова Т.Б., Котлов В.Ф. Методические основы оценки техногенных изменений геологической среды городов. – М.: Наука, 1990. – 197 с.
- Starovoirov E.I., Tratsesvskaya E.Yu., Kuznetsova E.L. Of dynamic characteristics three-phase soils and three-layer beams // *Journal of the Balkan Tribological Association*. – 2021. – Vol. 27. – № 5. – P. 929–946.
- Трацевская Е.Ю. Закономерности формирования геологических опасностей Беларуси: монография. – Гомель: 2008. – 121 с.
- Трацевская Е.Ю. Идентификация и прогнозирование геологических опасностей при городском строительстве, и районирование территории г. Гомеля по условиям их формирования // *Вестник Брестского университета*. – 2009. – № 1 (32). – С. 165–177.

19. Трацевская Е.Ю. К вопросу о геологическом обосновании инженерной защиты городов (на примере г. Гомеля) // Промышленное и гражданское строительство. – 2005. – № 3. – С. 46–47.
20. Фуникова В.В., Дудлер И.В. Проблема нарастающей опасности техногенных изменений геологической среды и пути ее решения // Геоэкология. Инженерная геология. Гидрогеология. Геокриология. – 2022. – № 1. – С. 3–12.
21. Фуникова В.В., Дудлер И.В., Бутаев Р.Т. Техногенные изменения режима подземных вод на застроенных территориях (геоэкологические, инженерно-геологические и гидрогеологические аспекты) // Геоэкология. Инженерная геология. Гидрогеология. Геокриология. – 2022. – № 2. – С. 21–32.
22. Zhuravkov M.A., Lyu Yongtao, Starovoitov E.I. Mechanics of Solid Deformable Body. – Singapore: Springer, 2023. – 317 p.
23. Vakhneev S., Starovoitov E. Damping of circular composite viscoelastic plate vibration under neutron irradiation // Journal of Applied Engineering Science. – 2020. – Vol. 18 (4). – P. 699–704
24. Pronina P.F., Tushavina O.V., Starovoitov E.I. Study of the radiation situation in Moscow by investigating elastoplastic bodies in a neutron flux taking into account thermal effects // Periódico Tchê Química. – 2020. – Vol. 17. – № 35. – P. 753–764.
25. Трацевская Е.Ю. Оценка геологических рисков на территории г. Гомель // Геоэкология, инженерная геология, гидрогеология, геокриология. – 2006. – № 2. – С. 124–134.
26. Трацевская Е.Ю., Абрамович О.К. Современное динамическое состояние геологической среды г. Гомеля и его влияние на инженерно-геологические условия // Литосфера. – 2008. – № 2 (29). – С. 129–137.
27. Трацевская Е.Ю., Жогло В.Г. Оценка физической уязвимости территории и дифференцированного экономического риска от процесса техногенного подтопления (на примере г. Гомеля) // Сергеевские чтения. – М.: ГЕОС, 2007. – Вып. 9. – С. 251–255.

Информация об авторах

Трацевская Елена Юрьевна, кандидат геолого-минералогических наук, доцент кафедры геологии и географии, Гомельский государственный университет имени Франциска Скорины, Беларусь, 246028, г. Гомель, ул. Советская, 104; eltrats@mail.ru

Поступила в редакцию: 03.11.2023

Поступила после рецензирования: 06.11.2023

Принята к публикации: 03.09.2024

REFERENCES

1. Osipov V.I., Eremina O.N., Kozlyakova I.V. Assessment of exogenous hazards and geological risk in urbanized territories (review of foreign experience). *Geoecology. Engineering geology. Hydrogeology. Geocryology*, 2017, no. 3, pp. 3–15. (In Russ.)
2. Culshaw M.G., Price S.J. The 2010 Hans Cloos Lecture. The contribution of urban geology to the development, regeneration and conservation of cities. *Bulletin of Engineering Geology and the Environment*, 2010, vol. 70, no. 3, pp. 333–376.
3. Burova V.N. Basic principles of risk assessment of urbanized territories. *Geoecology. Engineering geology. Hydrogeology. Geocryology*, 2020, no. 5. pp. 78–88. (In Russ.)
4. Abidin H.Z., Andreas H., Gumilar I., Fukuda Y., Pohan Y.E., Deguchi T. Land subsidence of Jakarta (Indonesia) and its relation with urban development. *Natural Hazards*, 2011, vol. 59 (3), pp. 1–19. DOI: 10.1007/s1 1069-011-9869-9
5. De Mulder E.F.J., Pereira J.J. Earth Science for the city. *Engineering geology for tomorrow's cities. Geological Society*. Eds. Culshaw M.G., Reeves H.J., Jefferson I., Spink T.W. London, Engineering Geology Special Publications, 2009. Vol. 22, pp. 25–31. DOI: 10.1144/EGSP22.2
6. Lewis S.L., Maslin M.A. Geological evidence for the Anthropocene. *Science*, 2015, vol. 349, Iss. 6245, pp. 246–247. DOI: <https://doi.org/10.1126/science.349.6245.246-b>
7. Marker B.R. Urban planning: the geoscience input. *Developments in Engineering Geology. Geological Society*. Eds. M.J. Eggers, J.S. Griffiths. London, Engineering Geology Special Publication, 2016. Vol. 27. pp. 35–43. DOI: <https://doi.org/10.1144/EGSP27.3>
8. Mucella Ates. The role of smart urban solutions on the way to smart territories: smart solutions to the problems of urbanization. *Information Technology and Communication Authority*, Turkey, 2020. pp. 1–18. DOI: 10.4018/978-1-7998-2097-0.ch001
9. Price S.J., Ford J.R., Campbell S.D.G., Jefferson I. Urban futures: the sustainable management of the ground beneath cities. *Developments in Engineering Geology. Geological Society*. Eds. M.J. Eggers, J.S. Griffiths. London, Engineering Geology Special Publication, 2016. Vol. 27. pp. 19–33. DOI: 10.1144/EGSP27.2
10. Waltham T. Sinking cities – Feature. *Geology Today*, 2002, vol. 18 (3). pp. 95–100. DOI: <https://doi.org/10.1046/j.1365-2451.2002.00341>
11. Golodkovskaya G.A., Eliseev Yu.B. *Geological environment of industrial regions*. Moscow, Nedra publ., 1989. 219 p. (In Russ.)
12. Emelianova T.I., Stokova L.A. On the principles and methodology of zoning of the territory on the stability of the geological environment to tekhnogennykh impact (on the example of the Tomsk region). *Geoecology. Engineering geology. Hydrogeology. Geocryology*, 1999, no. 2. pp. 164–171. (In Russ.)
13. Zaikanov V.G., Minakova T.B., Byldakova E.V. Geoecological processes in the city and assessment of their danger. *Geoecology. Engineering geology. Hydrogeology. Geocryology*, 2022, no. 3. pp. 82–96. (In Russ.)
14. Zaikanov V.G., Minakova T.B., Prosunthova N.S., Smirnova E.B., Zhigareva T.H. Geoecological research and assessment of urbanized territories. *Geoecology. Engineering geology. Hydrogeology. Geocryology*, 2000, no. 5. pp. 410–421. (In Russ.)
15. Koff G.K., Minakova T.B., Kotlov V.F. *Methodological bases of assessment of technogenic changes in the geological environment of cities*. Moscow, Nauka Publ., 1990. 197 p. (In Russ.)

16. Starovoitov E.I., Tratsevskaya E.Yu., Kuznetsova E.L. Of dynamic characteristics three-phase soils and three-layer beams. *Journal of the Balkan Tribological Association*, 2021, vol. 27, no. 5, pp. 929–946.
17. Tratsevskaya E.Yu. *Patterns of formation of geological hazards of Belarus. Monograph*. Gomel, 2008. 121 p. (In Russ.)
18. Tratsevskaya E.Yu. Identification and forecasting of geological hazards in urban construction, and zoning of the territory of Gomel according to the conditions of their formation. *Bulletin of the Brest University*, 2009, no. 1 (32), pp. 165–177. (In Russ.)
19. Tratsevskaya E.Yu. On the issue of geological justification of engineering protection of cities (on the example of Gomel). *Industrial and civil construction*, 2005, no. 3. pp. 46–47. (In Russ.)
20. Funikova V.V., Dudler I.V. Problem of the increasing danger of technogenic changes in the geological environment and ways to solve it. *Geoecology. Engineering geology. Hydrogeology. Geocryology*, 2022, no. 1, pp. 3–12. (In Russ.)
21. Funikova V.V., Dudler I.V., Butaev R.T. Technogenic changes in the groundwater regime in built-up areas (geoecological, engineering-geological and hydrogeological aspects). *Geoecology. Engineering geology. Hydrogeology. Geocryology*, 2022, no. 2, pp. 21–32. (In Russ.)
22. Zhuravkov M.A., Lyu Yongtao, Starovoitov E.I. *Mechanics of solid deformable body*. Singapore, Springer, 2023. 317 p.
23. Vakhneev S., Starovoitov E. Damping of circular composite viscoelastic plate vibration under neutron irradiation. *Journal of Applied Engineering Science*, 2020, vol. 18 (4), pp. 699–704.
24. Pronina P.F., Tushavina O.V., Starovoitov E.I. Study of the radiation situation in Moscow by investigating elastoplastic bodies in a neutron flux taking into account thermal effects. *Periódico Tchê Química*, 2020, vol. 17, no. 35, pp. 753–764.
25. Tratsevskaya E.Yu. Assessment of geological risks on the territory of Gomel. *Geoecology. Engineering geology. Hydrogeology. Geocryology*, 2006, no. 2, pp. 124–134.
26. Tratsevskaya E.Yu., Abramovich O.K. Current dynamic state of the geological environment of Gomel and its influence on engineering and geological conditions. *Lithosphere*, 2008, no. 2 (29), pp. 129–137. (In Russ.)
27. Tratsevskaya E.Yu., Zhoglo V.G. Assessment of the physical vulnerability of the territory and differentiated economic risk from the process of man-made flooding (using the example of the city of Gomel). *Sergeevsky readings*. Moscow, GEOS Publ., 2007. pp. 251–255. (In Russ.)

Information about the authors

Elena Yu. Tratsevskaya, Cand. Sc., Associate Professor, Francysk Skaryna Gomel State University, 104, Sovetskaya street, Gomel, 246028, Belarus; eltrats@mail.ru

Received: 03.11.2023

Revised: 06.11.2023

Accepted: 03.09.2024

УДК 504.1(571.55)

DOI: 10.18799/24131830/2024/9/4390

Шифр специальности ВАК: 1.6.10 (25.00.11); 1.6.21 (25.00.36)

Эколого-геохимическая оценка почв селитебных территорий Восточного Забайкалья

Б.Н. Абрамов, Т.Г. Цыренов[✉], Н.Ю. Михеева, Р.А. Филенко, М.Т. Усманов

Институт природных ресурсов, экологии и криологии СО РАН, России, г. Чита

[✉]master.of.pistols@mail.ru

Аннотация. Актуальность. Загрязнение окружающей среды отходами горнодобывающей промышленности относится к числу наиболее актуальных экологических проблем. **Цель:** определение степени загрязнения почв селитебных территорий Восточного Забайкалья. **Объекты:** суммарная загрязненность почв по формуле Саета (Z_c) в 30 населенных пунктах Восточного Забайкалья, в том числе в 14 населенных пунктах, связанных с добычей полезных ископаемых. **Методы.** Для установления степени загрязненности почвы населенных пунктов были объединены в следующие группы: населенные пункты при золоторудных, молибденовых свинцово-цинковых и редкометалльных месторождениях, а также населенные пункты, не связанные с добычей полезных ископаемых. Фактический материал получен при проведении исследований по базовым проектам Института природных ресурсов, экологии и криологии СО РАН с 2000 по 2022 гг. Кроме этого, использованы опубликованные данные и материалы территориальных геологических фондов (г. Чита). Для определения концентраций химических элементов использован рентгенофлуоресцентный метод в аналитических лабораториях Геологического института СО РАН (г. Улан-Удэ), ICP-MS ЗАО «SGS Vostok Limited» (г. Чита). **Результаты.** Среди рассматриваемых групп нп. установлены следующие показатели суммарной степени загрязненности почв (Z_c): горнорудные населенных пунктов свинцово-цинковых месторождений – 68,87; золоторудных – 30,67; молибденовых – 32,25; редкометалльных – 0,03; населенных пунктов, не связанных с горнорудной деятельностью, – 0,32. По суммарной степени загрязненности почв Z_c населенные пункты свинцово-цинковых месторождений соответствуют чрезвычайно опасным, молибденовых месторождений – опасным; золоторудных месторождений – умеренно опасным; населенные пункты редкометалльных месторождений и населенные пункты, не связанные с горнорудной деятельностью, – низким уровням загрязнения.

Ключевые слова: почвы населенных пунктов, токсичные элементы, селитебные территории, суммарная степень загрязнения почв, Восточное Забайкалье

Для цитирования: Эколого-геохимическая оценка почв селитебных территорий Восточного Забайкалья / Б.Н. Абрамов, Т.Г. Цыренов, Н.Ю. Михеева, Р.А. Филенко, М.Т. Усманов // Известия Томского политехнического университета. Инжиниринг георесурсов. – 2024. – Т. 335. – № 9. – С. 84–93. DOI: 10.18799/24131830/2024/9/4390

UDC 504.1(571.55)

DOI: 10.18799/24131830/2024/9/4390

Ecological and geochemical assessment of soils in residential areas of Eastern Transbaikalia

B.N. Abramov, T.G. Tsyrenov[✉], N.Yu. Mikheeva, R.A. Filenko, M.T. Usmanov

*Institute of Natural Resources, Ecology and Cryology, Siberian Branch of Russian Academy of Sciences,
Chita, Russian Federation*

[✉]master.of.pistols@mail.ru

Abstract. Relevance. Environmental pollution by mining wastes is one of the most urgent environmental problems. **Aim.** To determine the degree of soil pollution in the residential areas of Eastern Transbaikalia. **Objects.** Total soil pollution according to the Saet formula (Z_c) was studied in 30 settlements of Eastern Transbaikalia, including 14 settlements related to mining.

Methods. In order to determine the degree of soil contamination, the settlements were grouped: settlements at gold ore, molybdenum lead-zinc and rare-metal deposits, as well as settlements not related to mining. The factual material was obtained during the research under the basic projects of the Institute of Natural Resources, Ecology and Cryology of the Siberian Branch of the Russian Academy of Sciences from 2000 to 2022. In addition, published data and materials of the territorial geological funds (Chita) were used. The X-ray fluorescence method was used to determine the concentrations of chemical elements in analytical laboratories of the Geological Institute of SB RAS (Ulan-Ude), ISP-MS of ZAO "SGS Vostok Limited" (Chita). **Results.** Among the considered groups of settlements the following indicators of total soil contamination degree (Z_c) were established: mining settlements of lead-zinc deposits – 68.87; gold deposits – 30.67; molybdenum deposits – 32.25; rare-metal deposits – 0.03; settlements not related to mining activity – 0.32. According to the total degree of soil contamination Z_c , the settlements of lead-zinc deposits correspond to extremely hazardous, molybdenum deposits – hazardous; gold deposits – moderately hazardous; the settlements of rare-metal deposits and the ones not related to mining activities – low levels of pollution.

Keywords: soils of settlements, toxic elements, residential territories, total degree of soil pollution, Eastern Transbaikalia

For citation: Abramov B.N., Tsyrenov T.G., Mikheeva N.Yu., Filenko R.A., Usmanov M.T. Ecological and geochemical assessment of soils in residential areas of Eastern Transbaikalia. *Bulletin of the Tomsk Polytechnic University. Geo Assets Engineering*, 2024, vol. 335, no. 9, pp. 84–93. DOI: 10.18799/24131830/2024/9/4390

Введение

Восточное Забайкалье относится к числу старейших горнодобывающих регионов России. На территории Забайкальского края известно более 1000 рудопоявлений и месторождений золота, молибдена, олова, вольфрама редкометаллических и полиметаллических месторождений (рисунок). В течение 2019–2022 гг. сотрудники Института природных ресурсов, экологии и криологии СО РАН в рамках базовых проектов провели опробование почв населенных пунктов (нп.) Восточного Забайкалья. Были рассчитаны суммарные показатели загрязнения почв (Z_c) [1] в 30 населенных пунктах, из них 14 являются горнорудными поселениями, в пределах которых находится инфраструктура горно-обогачительных комбинатов (ГОК). Для установления степени загрязненности почвы нп. были объединены в следующие группы: нп. при золоторудных, молибденовых свинцово-цинковых и редкометаллических месторождениях, а также нп., не связанные с добычей полезных ископаемых. Одной из важных экологических проблем является состояние хвостохранилищ токсичных отходов горнорудного производства, которое влияет на все компоненты природной среды. Так, например, известно, что почвенный слой территорий, прилегающих к хвостохранилищам, интенсивно загрязнен и степень этого загрязнения напрямую зависит от концентраций токсичных элементов в хвостохранилищах и от близости расположения к ним [2–19].

В нп., связанных с работой ГОК, наблюдается неблагоприятная экологическая обстановка вследствие выбросов токсичных соединений в атмосферу, загрязнения водных объектов и почв стоками с хвостохранилищ, содержащих токсичные металлы. Непосредственными объектами техногенного загрязнения служат воды, почвы, атмосферный воздух, растительные и животные организмы и микро-

организмы, а также человек. Элементный состав почв селитебных территорий является одним из важных условий безопасного проживания населения [20].

При изучении хвостохранилищ особое внимание уделяют минералогическому анализу с выделением гипергенных стадий минералообразования. Выделяют следующие стадии их трансформации в зоне окисления: сульфиды–сульфаты–карбонаты (окислы). Минералы сульфатной стадии обладают наибольшей растворимостью и представляют наибольшую опасность для окружающей среды. Хвостохранилища изучаемых месторождений отличаются составом пород и руд, разным временным интервалам их образования. Большое значение имеет временной интервал их существования. Время заложения хвостохранилищ золоторудных и оловополиметаллических месторождений составляет более 60 лет, золоторудных (кроме Александровского месторождения), полиметаллических месторождений – 30–40 лет, молибденовых – более 20 лет. Процесс перехода сульфидных минералов в окисленные формы занимает 150–200 лет. Хвостохранилища, заложенные позднее, характеризуются меньшими степенями гипергенных преобразований. Степень гипергенных преобразований зависит также от количества и состава сульфидов. Хвостохранилища с повышенными содержаниями сульфидов характеризуются более высокой кислотностью водных растворов, являющихся главными факторами выщелачивания и миграции токсикантов. При окислении сульфидов хвостохранилищ происходит миграция элементов, в том числе и токсичных, во все компоненты природной среды [21].

Продукты деятельности ГОК оказывают неблагоприятное воздействие на все жизнеобеспечивающие среды: почвы, воздух, воду, растительность, аккумулирующие токсичные химические элементы.

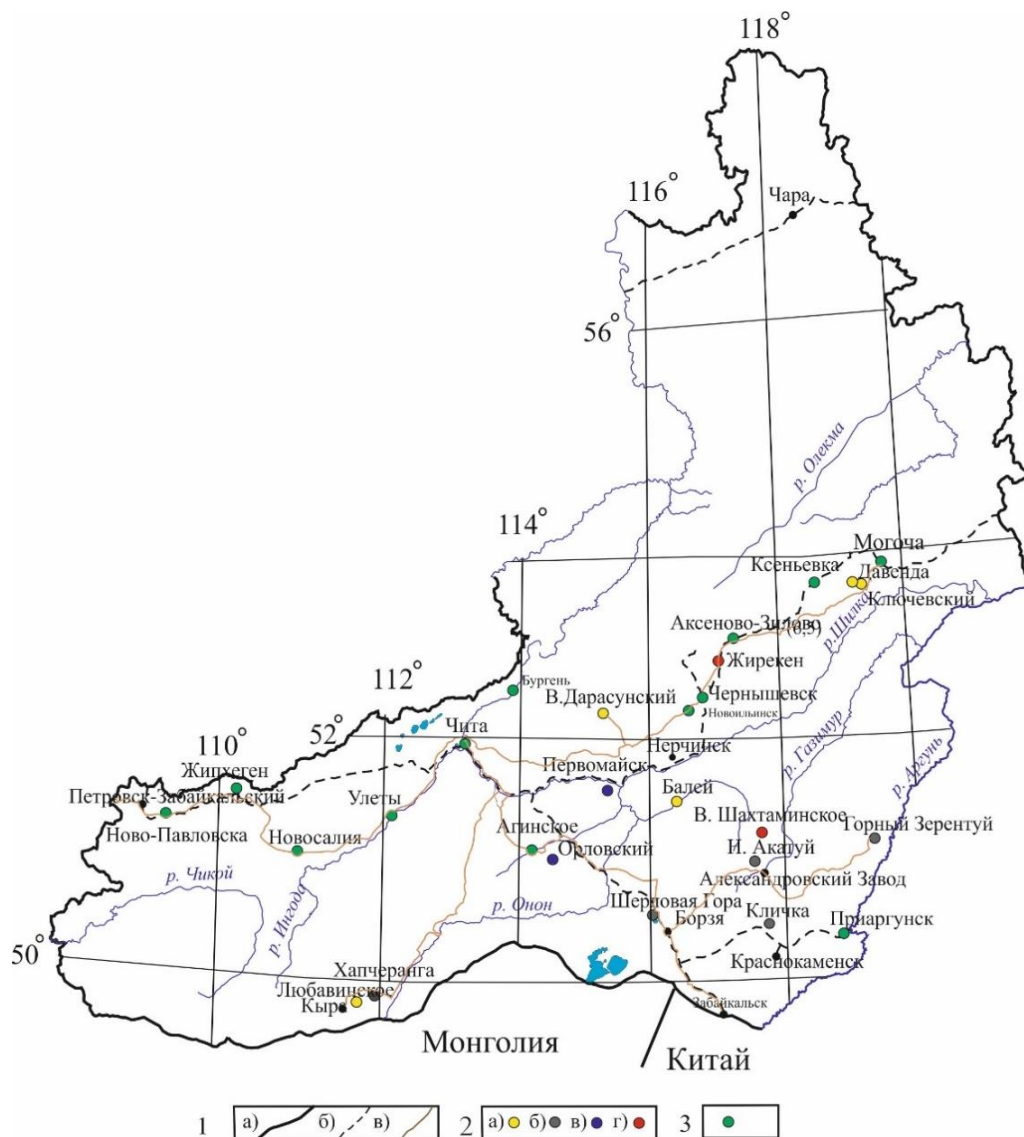


Рисунок. Схема опробования селитебных почв Восточного Забайкалья; 1 – а) административные и государственные границы; б) железные дороги; в) автомобильные дороги; 2 – нп. горнорудных районов при месторождениях: а) золота; б) свинца, цинка, олова; в) редких металлов; г) молибдена; 3 – нп., не связанные с горнорудной деятельностью

Figure. Scheme of testing residential soils of Eastern Transbaikalia 1 – а) administrative and state borders; б) railways; в) highways; 2 – settlements of mining districts with deposits: а) gold; б) lead, zinc, tin; в) rare metals; г) molybdenum; 3 – settlements not related to mining activities

Население в городских поселениях с горнорудными предприятиями, в сравнении с населением нп., не имеющими их, значительно чаще подвержено заболеваниям. В 1994–1996 гг. Восточно-Сибирский научный центр Российской академии медицинских наук (г. Иркутск) проводил работы в г. Балей. Цель исследований заключалась в обосновании территории г. Балей как зоны экологического неблагополучия [22]. Анализ показал, что в структуре заболеваемости выделены следующие особенности: патология органов кровообращения (более 15 %, а в среднем по РФ – 6,8 %), болезни органов дыхания, часто отмечаются анемия, патология ор-

ганов слуха и зрения, как врожденная (нейросенсорная потеря слуха, афакия, катаракта), так и возникающая в более поздние сроки. Образаемость по поводу данного заболевания в несколько раз превышает таковую в соседних районах Забайкальского края [22].

Изучением влияния хвостохранилищ на компоненты природной среды в Восточном Забайкалье занимались многие исследователи [23–32].

Основной задачей исследования является установление степени суммарного загрязнения селитебных почв нп. Восточного Забайкалья.

Методы исследования

Для расчета потенциальной экологической опасности использованы данные по содержаниям элементов в почвах нп. и локальных фонах. Сведения по концентрациям химических элементов получены при проведении исследований по базовым проектам Института природных ресурсов, экологии и криологии СО РАН. Кроме того, использованы опубликованные данные и сведения территориального геологического фонда по Забайкальскому краю (г. Чита). Для определения элементного состава проб почв применялся рентгенофлуоресцентный анализ в Геологическом институте СО РАН (г. Улан-Удэ) и ICP-MS в ЗАО «SGS Vostok Limited» (г. Чита). Глубина отбора проб на анализы составляла 0–10 см. Вес грунтовой пробы составлял 1,0 кг. Пробы в нп. отбирались главным образом вдоль основных улиц и автотрасс. Пробы для определения фоновых концентраций элементов в почвах отобраны вне зоны влияния техногенных объектов, в водораздельных частях ландшафтов, на удалении от них от нескольких сотен метров до 1–2 км.

Геохимические показатели загрязнения почв населенных пунктов Восточного Забайкалья

Рассмотрим распределение химических элементов первого, второго и третьего класса опасности в почвах селитебных территорий Восточного Забайкалья. По классу опасности химические элементы подразделяются на три класса: I класс – As, Cd, Hg, Pb, Zn; II класс – Ni, Cu, Sb, Cr; III класс – Mn, V [33]. В подвижной форме ко второму классу также относят Co. Согласно СанПиН 3685-21, такие элементы, как Sn, Mo, W и Sr, не имеют конкретного ПДК для почв и поэтому не имеют в настоящее время конкретного класса опасности. Тем не менее в водных средах W и Sr относятся ко II, а Sn и Mo – к III классу опасности. В действующем на сегодняшний день ГОСТ 17.4.1.02-83 данные элементы также принадлежат ко II и III классам опасности [34]. Поэтому в текущем исследовании для обозначения классов опасности дополнительно использована ссылка на действующий ГОСТ, что не имеет существенного значения для обсуждения результатов.

При расчетах коэффициентов концентраций элементов брались в расчет средние содержания элементов в почвах нп. по А.П. Виноградову [35]. По данным В.А. Алексеенко и др. средние содержания токсичных элементов в почвах селитебных территорий уменьшаются по мере снижения числа жителей в нп. [36]. В Восточном Забайкалье число жителей в нп. соответствуют малым нп. (таблица). Для оценки показателя загрязнения почв рассчитан суммарный показатель загрязнения (Z_c): [1]

$$Z_c = K_{ci} + \dots + K_{cn} - (n - 1), \quad (1)$$

где n – количество учитываемых химических элементов; K_{ci} – коэффициент концентрации i -го компонента загрязнения, превышающий единицу; $K_{ci} = C_i / C_{fi}$, где C_i – фактическое содержание i -го химического элемента в почвах и грунтах, мг/кг; C_{fi} – фоновое содержание i -го химического элемента в почвах и грунтах мг/кг. Значения, характеризующие суммарное загрязнение Z_c по уровню загрязнения, имеют следующие диапазоны: $Z_c < 16$ – низкий уровень; $16 < Z_c < 32$ – средний, умеренно опасный; $32 < Z_c < 64$ – высокий, опасный; $64 < Z_c < 128$ – максимальный, чрезвычайно опасный [1].

Для изучения степени влияния конкретного химического элемента в рассматриваемой выборке рассчитаем индексы геоаккумуляции (I_{geo}) в почвах нп. по методике, предложенной Г. Мюллером. Для вычислений применялась следующая формула [37]:

$$I_{geo} = \log_2 \frac{C_n}{1,5BE_n}, \quad (2)$$

где C_n – измеренная концентрация соединений тяжелых металлов в образце; BE_n – среднее геохимическое фоновое значение измеряемых элементов.

Значения индекса подразделяются на следующие уровни загрязненности: $I_{geo} \leq 0$ – практически незагрязненный; $0 < I_{geo} \leq 1$ – незагрязненный до умеренно загрязненного; $1 < I_{geo} \leq 2$ – умеренно загрязненный; $2 < I_{geo} \leq 3$ – средне загрязненный; $3 < I_{geo} \leq 4$ – сильно загрязненный; $4 < I_{geo} \leq 5$ – сильно загрязненный до чрезмерно загрязненного; $I_{geo} > 5$ – чрезмерно загрязненный.

Результаты исследования

Содержания элементов в почвах горняцких поселков в среднем на порядок превышают таковые в почвах нп., не связанных с горнорудной деятельностью. Результаты расчета суммарного показателя загрязнения почв (Z_c) указывают на то, что селитебные почвы нп, при горно-обогатительных комбинатах в среднем на порядок превышают таковые показатели в почвах нп., не связанных с горнорудной деятельностью (таблица).

Установлены следующие средние значения суммарных показателей степени загрязнения рассматриваемых групп нп.: нп. при свинцово-цинковых месторождениях – $Z_c = 68,87$; золоторудных – $Z_c = 30,67$; молибденовых – $Z_c = 32,25$; редкометалльных $Z_c = 0,03$; нп., не связанных с горнорудной деятельностью – $Z_c = 0,32$. Разные значения показателей загрязнения объясняются разными содержаниями токсичных элементов в техноземах хвостохранилищ. Степень загрязнения почв рабочих поселков при горно-обогатительных комбинатах в основном соответствует опасным и умеренно опасным показателям месторождения (таблица). Почвы нп., не связанных с горнорудной деятельностью, соответствуют низким показателям загрязненности.

Таблица. Эколого-геохимические показатели состояния почв в населенных пунктах Восточного Забайкалья (содержания элементов в г/т)

Table. Ecological and geochemical indicators of soil condition in settlements of Eastern Transbaikalia (content of elements in g/t)

Элементы/Elements	As	Pb	Zn	Cd	Cu	Sn	Mo	Sb	Ba	Sr
К	5	10	50	0,5	20	10	3	10	500	300
ПДК/МРС	2,0	32	55,0	0,5	33,0	53	254	4,5	165	600
Населенные пункты при золоторудных месторождениях/Settlements at gold deposits										
Селитебные почвы/Residential soils (n=31) Z _c =30,67										
As>Mo>Pb>Cd>Zn>Cu, As>Cu>Mo>Zn										
x	475,0	96,45	172,45	4,90	40,20	10,2	55,7	47,97	735,8	278,9
s	607,2	143,85	269,82	4,75	23,34	6,53	82,8	82,79	368,0	160,1
x/K	95,0	9,65	3,45	9,8	2,0	1,0	18,57	4,8	1,47	0,93
x/ПДК/x/МРС	237,5	3,01	3,14	9,8	1,22	0,2	0,22	10,66	4,46	0,46
I _{geo}	2,41	0,84	0,71	2,44	-0,21	1,44	-1,51	2,86	-0,95	-0,90
Фон/Background (n=6)										
x	59,64	35,8	70,2	0,6	31	2,5	105,5	4,4	948,6	347
s	87,84	26,53	38,58	–	18,13	–	54,1	–	285,27	90,32
Населенные пункты при свинцово-цинковых месторождениях/Settlements at lead-zinc deposits										
Селитебные почвы/Residential soils (n=42) Z _c =68,87										
As>Pb>Zn>Cd>Cu>Mo, As>Zn>Pb>Cu										
x	584,6	859,07	930,65	6,00	55,67	9,41	3,04	18,58	578,7	231,6
s	1056,1	2180,7	1920,53	14,36	80,50	19,64	2,85	37,00	201,71	122,73
x/K	116,92	85,9	18,61	12,0	2,78	0,94	1,0	1,86	1,16	0,77
x/ПДК/x/МРС	292,3	26,85	16,92	12,0	1,69	0,18	0,01	4,13	3,51	0,39
I _{geo}	3,36	3,85	2,57	3,60	1,07	0,29	-1,99	2,11	-0,83	-0,63
Фон/Background (n=17)										
x	37,92	39,58	104,60	0,33	17,67	5,13	8,03	2,86	686,76	238,48
s	11,74	25,87	40,08	0,19	13,48	4,19	7,61	1,70	176,41	102,68
Населенные пункты при молибденовых месторождениях/Settlements at molybdenum deposits										
Селитебные почвы/Residential soils (n=14) Z _c =32,25										
Mo>As>Pb>Cu>Zn>Cd, As>Cu>Mo>Zn>Sb>Pb										
x	159,92	91,26	123,00	2,25	168,89	6,16	127,88	18,84	637,14	278,50
s	498,66	81,80	110,62	3,69	133,34	1,53	190,88	18,37	149,63	103,21
x/K	31,98	9,03	2,46	4,5	8,44	0,62	42,63	1,88	1,27	0,93
x/ПДК/x/МРС	79,96	2,85	2,24	4,5	5,12	0,12	0,5	4,19	3,86	0,46
I _{geo}	2,43	0,67	0,20	2,32	1,70	0,07	2,21	1,97	-0,60	-0,21
Фон/Background (n=6)										
x	19,8	38,2	71,25	0,3	34,7	3,9	18,45	3,2	643,45	214,65
s	13,86	9,76	1,48	0,21	13,15	2,76	13,65	2,26	165,82	25,39
Населенные пункты при редкометалльных месторождениях/Settlements at rare metal deposits										
Селитебные почвы/Residential soils (n=6) Z _c =0,03										
As>Pb>Sb>Zn>Cu, As>Cu>Sb>Mo>Zn>Pb										
x	20,25	34,25	50,50	–	18,60	22,50	95,67	21,67	596,75	235,75
s	13,33	38,56	12,29	–	2,41	3,54	66,93	2,89	48,02	28,39
x/K	4,05	3,43	1,0	–	0,93	2,25	31,89	2,17	1,19	0,79
x/ПДК/x/МРС	10,13	1,07	0,92	–	0,56	0,42	0,38	4,82	3,62	0,39
I _{geo}	0,30	0,81	-0,28	–	-0,76	–	-1,27	–	-0,67	-0,79
Фон/Background (n=1)										
	11	13	41	–	21	–	154	–	634	271
Населенные пункты, не связанные с горнорудной деятельностью/Settlements not related to mining activities										
Селитебные почвы/Residential soils (n=65) Z _c =0,32										
As>Mo>Pb>Sn>Zn>Cu, As>Cu>Mo>Zn>Pb										
x	32,01	37,79	63,84	–	21,45	13,33	23,74	10,03	416,98	159,08
s	36,35	33,20	73,45	–	17,19	4,70	43,18	9,74	358,10	176,56
x/K	6,4	3,78	1,28	–	1,07	1,33	7,91	1,0	0,83	0,32
x/ПДК/x/МРС	16,01	1,18	1,16	–	0,65	0,25	0,09	2,23	2,53	0,27
I _{geo}	0,70	0,62	-0,47	–	-0,53	–	-2,86	-0,23	-1,61	-1,70
Фон/Background (n=19)										
x	13,11	16,35	58,78	0,06	20,65	–	114,83	7,85	847,67	344,79
s	11,87	7,86	39,07	0,03	11,37	–	73,94	4,45	281,62	178,59

Примечание: x – среднее арифметическое, s – стандартное отклонение; Z_c – суммарный показатель загрязнения; As>Pb>Zn>Cd – коэффициенты концентраций элементов (x/K), от большего к меньшему значению; I_{geo} – индекс геоаккумуляции элементов; As>Zn>Pb>Cu – отношение средних значений к ПДК, от большего к меньшему значению; K – среднее содержание элементов в почвах [35], ПДК – предельно допустимые концентрации элементов в почвах [38–40]; «–» – нет данных.

Note: x is the arithmetic mean, s is the standard deviation; Z_c is the total pollution indicator; As>Pb>Zn>Cd is the coefficients of the concentrations of elements (x/K), from a higher to a lower value; I_{geo} is the geoaccumulation indicator of elements; As>Zn>Pb>Cu is the ratio of average values to MPC, from higher to lower values; K is the average content of elements in soils [35], MPC is the maximum permissible concentrations of elements in soils [38–40]. "–" no data available.

Повышенные коэффициенты концентрации ряда элементов в почвах селитебных территорий относительно фоновых содержаний их в почвах связано с процессами миграции элементов из хвостохранилищ в почвы населенных пунктов.

В ряде случаев фоновые концентрации элементов превышают таковые в селитебных почвах. Повышенные концентрации ряда элементов на фоновых участках можно объяснить особенностями геологического строения данных территорий.

В селитебных почвах рудных месторождений в целом выдерживается последовательность коэффициентов концентраций элементов от большего к меньшему значению: $As > Pb > Zn$. Для молибденовых месторождений типична последовательность $Mo > As > Pb$.

Значения индекса геоаккумуляции элементов в селитебных почвах относительно коэффициентов концентрации элементов имеют различия в градации. Для нп., прилегающих к свинцово-цинковым и редкометалльным месторождениям, градация в целом сохраняется. Для нп. в пределах золоторудных месторождений наибольшие значения индекса I_{geo} отмечены для Sb (2,86), Cd (2,44), As (2,41), Sn (1,44), Pb (0,84) и Zn (0,71). В нп. в пределах молибденовых месторождений – As (2,43), Cd (2,32), Mo (2,21), Sb (1,97), Cu (1,7). В нп., не подверженных влиянию горнорудной деятельности градация значений индекса также расходитсся с градацией коэффициентов концентрации (таблица).

Можно сделать вывод, что наибольший вклад в загрязнение почв, согласно рассчитанным индексам I_{geo} , вносят элементы первого и второго классов опасности. В нп. золоторудных и молибденовых месторождений значения индексов соответствуют по As, Cd, Cu, Sb и Sn уровню загрязненности от умеренно загрязненных до сильно загрязненных (таблица). В нп. свинцово-цинковых месторождений загрязнение почв As, Pb и Cd соответствуют сильно загрязненному уровню, Zn и Sb – средне загрязненному, Cu – умеренно загрязненному. Расчеты с использованием данных таблицы показывают anomalно высокие превышения ПДК токсичных элементов в почвах населенных пунктов при ГОК свинцово-цинковых и золоторудных месторождений.

Существенное влияние на степень загрязнения почв горняцких поселков оказывает их расположение относительно гипсометрических отметок отвалов вскрышных горных пород и хвостохранилищ. Среди рассматриваемых нп. наибольшей степенью загрязнения почв характеризуются располагающиеся в зоне влияния свинцово-цинковых и золоторудных месторождений. Высокие значения суммарного показателя загрязнения почв (Z_c) можно объяснить расположением хвостохранилищ ГОК в черте населенного пункта.

Заключение

Впервые для Восточного Забайкалья проведен сравнительный анализ значений суммарного показателя загрязнения селитебных почв (Z_c) населенных пунктов при градообразующих горнодобывающих комбинатах и населенных пунктов, не связанных с горнорудной деятельностью. Установлено, что значения средних суммарных загрязнений почв селитебных горнорудных территорий существенно превышают таковые значения среднего суммарного загрязнения почв населенных пунктов, не связанных с горнорудной деятельностью. Значения Z_c почв населенных пунктов свинцово-цинковых месторождений превышают значения Z_c населенных пунктов, не связанных с горнорудной деятельностью в 215,2 раз, золоторудных месторождений – в 95,8 раз, молибденовых месторождений – в 100,8 раз. Отмечено, что значение Z_c редкометалльных месторождений в 10,7 раз меньше значения Z_c населенных пунктов, не связанных с горнорудной деятельностью.

Анализ эколого-геохимического состояния почв селитебных территорий Восточного Забайкалья выявил следующие закономерности распределения показателей суммарного загрязнения:

1. Среди горнорудных поселков наибольшие значения показателя суммарного загрязнения почв выделены в поселках при ГОК свинцово-цинковых и молибденовых месторождений, где значения индекса соответствуют уровням «чрезвычайно опасный» и «опасный». Горняцкие поселки при ГОК золоторудных месторождений отвечают среднему показателю суммарного загрязнения почв. Населенные пункты, не связанные с горнорудной деятельностью, а также нп. при ГОК редкометалльных месторождений характеризуются низким показателем суммарного загрязнения почв ($Z_c < 16$).
2. Коэффициенты концентраций элементов в почвах горняцких поселков отражают наличие преобладающих рудных элементов в хвостохранилищах. Коэффициенты концентраций элементов от большего к меньшему значению в целом выдерживается последовательность $As > Pb > Zn$. Для молибденовых месторождений типична последовательность $Mo > Pb > Zn$.
3. Значения индекса геоаккумуляции элементов в селитебных почвах относительно коэффициентов концентрации элементов имеют различия в градации. Для нп., прилегающих к свинцово-цинковым и редкометалльным месторождениям, градация в целом сохраняется. Наибольший вклад в загрязнение почв населенных пунктов, согласно рассчитанным индексам, вносят элементы первого и второго классов опасности – мышьяк, свинец, цинк, кадмий, медь, сурьма и

олово. По содержанию свинца и цинка почвы нп. соответствуют уровню загрязненности от умеренно загрязненного до сильно загрязненного.

4. В селитебных почвах горнорудных поселков отмечены следующие превышения ПДК: As – в 292,3, Pb – в 26,9, Zn – в 16,9, Cd – в 12, Cu – в 5, Sb – в 10,7 раз.

СПИСОК ЛИТЕРАТУРЫ

1. Геохимия окружающей среды / Ю.Е. Сает, Б.А. Ревич, Е.П. Янин, Р.С. Смирнова, И.Л. Башаркевич, Т.Л. Онищенко, Л.Н. Павлова, Н.Я. Трефилова, А.И. Ачкасов, С.И. Саркисян. – М.: Недра, 1990. – 335 с.
2. Soil contamination by copper: sources, ecological risks, and mitigation strategies in Brazil / G. Poggere, A. Gasparin, J.Z. Barbosa, G.W. Melo, R.S. Corrêa, A.C.V. Motta // *Journal of Trace Elements and Minerals*. – 2023. – Vol. 4. – 100059. DOI: 10.1016/j.jtemin.2023.100059.
3. Omeke M.E., Igwe O., Unigwe C.O. An integrated approach to the bioavailability, ecological, and health risk assessment of potentially toxic elements in soils within a barite mining area, SE Nigeria // *Environmental Monitoring and Assessment*. – 2022. – Vol. 194. – № 3. – 212. DOI: 10.1007/s10661-022-09856-2
4. Ecological risk assessment and source analysis of heavy metals in the soils of a lead-zinc mining watershed area / Y. Pan, M. Chen, X. Wang, Y. Chen, K. Dong // *Water*. – 2023. – Vol. 15. – № 1. – 113. DOI: 10.3390/w15010113.
5. Applied methodological approach for the assessment of soil contamination by trace elements around abandoned coal mines – a case study of the Jerada Coal Mine, Morocco / A. Khalil, Y. Taha, M. Benzaazoua, R. Hakkou // *Minerals*. – 2023. – Vol. 13. – № 2. – 181. DOI: 10.3390/min13020181.
6. Contamination, source identification, ecological and human health risks assessment of potentially toxic-elements in soils of typical rare-earth mining areas / J. Fan, L. Deng, W. Wang, X. Yi, Z. Yang // *International Journal of Environmental Research and Public Health*. – 2022. – Vol. 19. – № 22. – 15105. DOI: 10.3390/ijerph192215105
7. Environmental and health risk assessment of soil adjacent to a self-burning waste pile from an abandoned coal mine in Northern Portugal / P. Santos, J. Ribeiro, J. Espinha Marques, D. Flores // *Environments*. – 2023. – Vol. 10. – № 3. – 53. DOI: 10.3390/environments10030053.
8. Geochemical baseline and pre-mining environmental assessment of heavy metals at iron exploration area, Northeastern Aswan, Egypt / M.T. Mostafa, H.E. Nady, R.M. Goma, F.H. Abdelgawad, H.I. Farhat, I.H. Khalifa, S.A. Salman // *Water, Air, & Soil Pollution*. – 2023. – Vol. 234. – № 7. – 456. DOI: 10.1007/s11270-023-06466-7.
9. Hara J., Kawabe Y. Geochemical characteristics and risk assessment of minor elements in subsurface soils of abandoned mine-rich Shikoku region, Japan // *Journal of Soils and Sediments*. – 2023. – Vol. 23. – P. 718–730. DOI: 10.1007/s11368-022-03369-8.
10. Heavy metal contamination and ecological risk assessment in soils of the pawara gold mining area, Eastern Cameroon / Y. Fodoué, A. Ismail, M. Yannah, M.J. Wirmvem, C.B. Mana // *Earth*. – 2022. – Vol. 3. – № 3. – P. 907–924. DOI: 10.3390/earth3030053.
11. Omeke M.E., Igwe O. Heavy metals concentration in soils and crop plants within the vicinity of abandoned mine sites in Nigeria: an integrated indexical and chemometric approach // *International Journal of Environmental Analytical Chemistry*. – 2021. – P. 4111–4129. DOI: 10.1080/03067319.2021.1922683.
12. Spatial distribution, migration, and ecological risk of Cd in sediments and soils surrounding sulfide mines – a case study of the Dabaoshan Mine of Guangdong, China / W. Sheng, Q. Hou, Z. Yang, T. Yu // *Water*. – 2023. – Vol. 15. – № 12. – 2223. DOI: 10.3390/w15122223.
13. Trace element geochemical imprints and multi-path health risk assessment of potentially toxic elements in soils from the polymetallic area of Tashan-Jatau, Northwestern Nigeria / O.B. Omang, H. Effiom, M.E. Omeke, P. Oko, A.E. Asinya, T.L. Ojikutu, T.G. Kave // *Global Journal of Geological Sciences*. – 2023. – Vol. 21. – № 1. – P. 91–115. DOI: 10.4314/qjgs.v21i1.7.
14. Estimation of potentially toxic elements contamination in anthropogenic soils on a brown coal mining dumpsite by reflectance spectroscopy: a case study / A. Gholizadeh, L. Boruvka, R. Vašát, M. Saberioon, A. Klement, J. Kratina, V. Tejnecký, O. Drábek // *PLoS ONE*. – 2015. – Vol. 10. – № 2. – e0117457. DOI: 10.1371/journal.pone.0117457.
15. Jacka J.K. The anthropology of mining: the social and environmental impacts of resource extraction in the mineral age // *Annual Review of Anthropology*. – 2018. – Vol. 47. – P. 61–77. DOI: 10.1146/annurev-anthro-102317-050156.
16. Onsachi J.M., Yakubu H.M., Shaibu M.M. Evaluation of Potentially Toxic Elements (PTE) from mine effluence discharge (case study of National Iron Ore Mining Company (NIOMCO), Itakpe, Kogi State – North Central, Nigeria // *The International Journal of Engineering and Science (IJES)*. – 2018. – Vol. 7. – № 9. – III. – P. 47–54. DOI: 10.9790/1813-0709034754.
17. Human health risk exposure and ecological risk assessment of potentially toxic element pollution in agricultural soils in the district of Frydek Mistek, Czech Republic: a sample location approach / P.C. Agyeman, K. John, N.M. Kebonye, L. Boruvka, R. Vašát, O. Drábek, K. Nemecek // *Environmental Sciences Europe*. – 2021. – Vol. 33. – № 1. – 137. DOI: 10.1186/s12302-021-00577-w.
18. Study of spatial distribution of potentially toxic elements in a nature reserve in Langata Ecosystem / S.B. Otieno, E. Ngumbi, C. Odhiambo-Nyan'gaya, J. Gakunju // *Journal of Health and Environmental Research*. – 2020. – Vol. 6. – № 4. – P. 114–118. DOI: 10.11648/j.jher.20200604.12.
19. Source patterns of potentially toxic elements (PTEs) and mining activity contamination level in soils of Taltal city (Northern Chile) / A. Reyes, M. Thiombane, A. Panico, L. Daniele, A. Lima, M. Di Bonito, B. De Vivo // *Environmental Geochemistry and Health*. – 2020. – Vol. 42. – № 8. – P. 2573–2594. DOI: 10.1007/s10653-019-00404-5.
20. Ребров В.Г., Громова О.А. Витамины, макро- и микроэлементы. – М.: ГЭОТАР Медиа, 2008. – 960 с.
21. Юргенсон Г.А., Филенко Р.А. Об унаследованности геохимической специализации отходов горного производства от рудноформационной принадлежности рудных месторождений на примере Забайкалья // *Геосферные исследования*. – 2018. – № 4. – С. 21–31. DOI: 10.17223/25421379/9/3.

22. Тихонова Е.В., Бишарова Г.И. Причины формирования трансформации щитовидной железы у детей дошкольного возраста г. Бaley // Бюллетень Восточно-Сибирского научного центра Сибирского отделения Российской Академии медицинских наук. – 2005. – № 4 (42). – С. 137–138.
23. Оценка потенциальной экологической опасности природно-техногенных комплексов рудных месторождений Восточного Забайкалья / Б.Н. Абрамов, О.В. Еремин, Р.А. Филенко, Т.Г. Цыренов // Геосферные исследования. – 2020. – № 2. – С. 64–75. DOI: 10.17223/25421379/15/5.
24. Абрамов Б.Н. Оценка токсичности хвостохранилищ рудных месторождений Забайкальского края // Горно-информационно-аналитический бюллетень (научно-технический журнал). – 2021. – № 11. – С. 136–145. DOI: 10.25018/0236_1493_2021_11_0_136.
25. Абрамов Б.Н. Геоэкологическая характеристика природно-техногенных комплексов свинцово-цинковых месторождений Восточного Забайкалья // Вестник Воронежского университета. Серия: Геология. – 2022. – № 1. – С. 67–76. DOI: 10.17308/geology.2022.1/9101.
26. Абрамов Б.Н., Цыренов Т.Г. Закономерности распределения токсичных элементов в почвах населенных пунктов горнорудных территорий Восточного Забайкалья // Геоэкология. Инженерная геология, гидрогеология, геокриология. – 2022. – № 5. – С. 1–10. DOI: 10.31857/S0869780922050022.
27. Состояние почвенного покрова в районах техногенных биогеохимических аномалий Забайкалья / Е.А. Бондаревич, Н.Н. Коцюржинская, А.А. Войченко, Т.Ю. Войченко, О.А. Лескова, А.П. Лесков // Успехи современного естествознания. – 2020. – № 3. – С. 57–64. DOI: 10.17513/use.37346.
28. Эколого-геохимическая оценка распределения токсичных элементов в почвенном покрове в зоне воздействия горно-обогатительного комбината (на примере Хапчерангинского горно-обогатительного комбината, (Забайкальский край) / М.А. Солодухина, Е.А. Бондаревич, Л.А. Михайлова, Ю.А. Витковский, Р.А. Филенко // Геосферные исследования. – 2021. – № 1. – С. 87–93. DOI: 10.17223/25421379/18/7.
29. Мязин В.П., Михайлютина С.И. Комплексная оценка техногенного загрязнения почв и продуктов питания тяжелыми металлами при размещении хвостохранилищ в Восточном Забайкалье // Горный информационно-аналитический бюллетень. – 2006. – № 9. – С. 164–170.
30. Михайленко В.Н. Проблема техногенных отходов горного производства в России // Горный информационно-аналитический бюллетень. – 2006. – № 2. – С. 121–123.
31. Михайлютина С.И. Комплексная эколого-геохимическая оценка загрязнения тяжелыми металлами компонентов природной среды горнорудных поселений Восточного Забайкалья: автореф. дис. ... канд. техн. наук. – Иркутск, 2007. – 21 с.
32. Птицын А.Б. Проблемы освоения техногенных месторождений Забайкалья // Геология и минерально-сырьевые ресурсы Сибири. – 2014. – № S3-2. – С. 128–130.
33. ГОСТ Р 70281-2022 Охрана окружающей среды. Почвы. Классификация химических веществ для контроля загрязнения. Официальное издание. – М.: РСТ, 2022 – 8 с.
34. МУ 2.1.7.730099 Почва, очистка населенных мест, бытовые и промышленные отходы, санитарная охрана почвы. Гигиеническая оценка качества почвы населенных мест. – М.: Федеральный центр госсанэпиднадзора Минздрава России, 1999. – 20 с.
35. Виноградов А.П. Геохимия редких и рассеянных химических элементов в почвах. – М.: Изд-во Академии наук СССР, 1957. – 238 с.
36. Алексеенко В.А., Алексеенко А.В. Химические элементы в геохимических системах. Кларки почв селитебных территорий. – Ростов н/Д: Изд-во Южного федерального университета, 2013. – 380 с.
37. Müller G. Index of geoaccumulation in sediments of the Rhine River // GeoJournal. – 1969. – Vol. 2. – № 3. – P. 108–118.
38. СанПиН 1.2.3685-21 Гигиенические нормативы и требования к обеспечению безопасности и (или) безвредности для человека факторов среды обитания. – М.: Роспотребнадзор, 2021. – 469 с.
39. Maximum permissible and negligible concentrations for metals and metalloids in The Netherlands, taking into account background concentrations / T. Crommentuijn, D. Sijm, J.D. Bruijn, M.V.D. Hoop, K.V. Leeuwen, E.V.D. Plassche // Journal of Environmental Management. – 2000. – Vol. 60. – № 2 – P. 121–143. DOI: 10.1006/jema.2000.0354.
40. Ковальский В.В. Геохимическая экология. – М.: Изд-во «Недра», 1974. – 303 с.

Информация об авторах

Баир Намжилович Абрамов, доктор геолого-минералогических наук, ведущий научный сотрудник лаборатории геохимии и рудогенеза Института природных ресурсов, экологии и криологии СО РАН, Россия, 672014, г. Чита, ул. Недорезова, 16а; b_abramov@mail.ru; <https://orcid.org/0000-0002-8905-1677>

Тимур Гармажапович Цыренов, младший научный сотрудник лаборатории геохимии и рудогенеза Института природных ресурсов, экологии и криологии СО РАН, Россия, 672014, г. Чита, ул. Недорезова, 16а; master.of.pistols@mail.ru; <https://orcid.org/0000-0002-6058-164X>

Наталья Юрьевна Михеева, младший научный сотрудник лаборатории геоэкологии и гидрогеохимии Института природных ресурсов, экологии и криологии СО РАН, Россия, 672014, г. Чита, ул. Недорезова, 16а; nataster6565@mail.ru

Роман Андреевич Филенко, научный сотрудник лаборатории геохимии и рудогенеза Института природных ресурсов, экологии и криологии СО РАН, Россия, 672014, г. Чита, ул. Недорезова, 16а; filrom@yandex.ru; <https://orcid.org/0000-0001-6736-9556>

Марат Тимурович Усманов, научный сотрудник лаборатории геоэкологии и гидрогеохимии Института природных ресурсов, экологии и криологии СО РАН, Россия, 672014, г. Чита, ул. Недорезова, 16а; usgi@yandex.ru; <https://orcid.org/0000-0003-4676-6741>

Поступила в редакцию: 12.09.2023

Поступила после рецензирования: 15.07.2024

Принята к публикации: 09.09.2024

REFERENCES

1. Saet Yu.E., Revich B.A., Yanin E.P., Smirnova R.S., Basharkevich I.L., Onishchenko T.L., Pavlova L.N., Trefilova N.Ya., Achkasov A.I., Sarkisyan S.Sh. *Geochemistry of the environment*. Moscow, Nedra Publ., 1990. 335 p. (In Russ.)
2. Poggere G., Gasparin A., Barbosa J.Z., Melo G.W., Corrêa R.S., Motta A.C.V. Soil contamination by copper: Sources, ecological risks, and mitigation strategies in Brazil. *Journal of Trace Elements and Minerals*, 2023, vol. 4, 100059. DOI: 10.1016/j.jtemin.2023.100059.
3. Omeke M.E., Igwe O., Unigwe C.O. An integrated approach to the bioavailability, ecological, and health risk assessment of potentially toxic elements in soils within a barite mining area, SE Nigeria. *Environmental Monitoring and Assessment*, 2022, vol. 194, no. 3, 212. DOI: 10.1007/s10661-022-09856-2.
4. Pan Y., Chen M., Wang X., Chen Y., Dong K. Ecological risk assessment and source analysis of heavy metals in the soils of a lead-zinc mining watershed area. *Water*, 2023, vol. 15, no. 1, 113. DOI: 10.3390/w15010113.
5. Khalil A., Taha Y., Benzaazoua M., Hakkou R. Applied methodological approach for the assessment of soil contamination by trace elements around abandoned coal mines – a case study of the Jerada Coal Mine, Morocco. *Minerals*, 2023, vol. 13, no. 2, 181. DOI: 10.3390/min13020181.
6. Fan J., Deng L., Wang W., Yi X., Yang Z. Contamination, source identification, ecological and human health risks assessment of potentially toxic-elements in soils of typical rare-earth mining areas. *International Journal of Environmental Research and Public Health*, 2022, vol. 19, no. 22, 15105. DOI: 10.3390/ijerph192215105.
7. Santos P., Ribeiro J., Espinha Marques J., Flores D. Environmental and health risk assessment of soil adjacent to a self-burning waste pile from an abandoned coal mine in Northern Portugal. *Environments*, 2023, vol. 10, no. 3, 53. DOI: 10.3390/environments10030053.
8. Mostafa M.T., Nady H.E., Gomaa R.M., Abdelgawad F.H., Farhat H.I., Khalifa I.H., Salman S.A. Geochemical baseline and pre-mining environmental assessment of heavy metals at iron exploration area, Northeastern Aswan, Egypt. *Water, Air, & Soil Pollution*, 2023, vol. 234, no. 7, 456. DOI: 10.1007/s11270-023-06466-7.
9. Hara J., Kawabe Y. Geochemical characteristics and risk assessment of minor elements in subsurface soils of abandoned mine-rich Shikoku region, Japan. *Journal of Soils and Sediments*, 2023, vol. 23, pp. 718–730. DOI: 10.1007/s11368-022-03369-8.
10. Fodoué Y., Ismaila A., Yannah M., Wirmvem M.J., Mana C.B. Heavy Metal Contamination and Ecological Risk Assessment in Soils of the Pawara Gold Mining Area, Eastern Cameroon. *Earth*, 2022, vol. 3, no. 3, pp. 907–924. DOI: 10.3390/earth3030053.
11. Omeke M.E., Igwe O. Heavy metals concentration in soils and crop plants within the vicinity of abandoned mine sites in Nigeria: an integrated indexical and chemometric approach. *International Journal of Environmental Analytical Chemistry*, 2021, pp. 4111–4129. DOI: 10.1080/03067319.2021.1922683.
12. Sheng W., Hou Q., Yang Z., Yu T. Spatial distribution, migration, and ecological risk of cd in sediments and soils surrounding sulfide mines – a case study of the Dabaoshan Mine of Guangdong, China. *Water*, 2023, vol. 15, no. 12, 2223. DOI: 10.3390/w15122223.
13. Omang O.B., Effiom H., Omeke M.E., Oko P., Asinya A.E., Ojikutu T.L., Kave T.G. Trace element geochemical imprints and multi-path health risk assessment of potentially toxic elements in soils from the polymetallic area of Tashan-Jatau, Northwestern Nigeria. *Global Journal of Geological Sciences*, 2023, vol. 21, no. 1, pp. 91–115. DOI: 10.4314/qjgs.v21i1.7.
14. Gholizadeh A., Boruvka L., Vašát R., Saberioon M., Klement A., Kratina J., Tejnecký V., Drábek O. Estimation of potentially toxic elements contamination in anthropogenic soils on a brown coal mining dumpsite by reflectance spectroscopy: a case study. *PLoS ONE*, 2015, vol. 10, no. 2, e0117457. DOI: 10.1371/journal.pone.0117457.
15. Jacka J.K. The anthropology of mining: the social and environmental impacts of resource extraction in the mineral age. *Annual Review of Anthropology*, 2018, vol. 47, pp. 61–77. DOI: 10.1146/annurev-anthro-102317-050156.
16. Onsachi J.M., Yakubu H.M., Shaibu M.M. Evaluation of Potentially Toxic Elements (PTE) from mine effluence discharge (case study of National Iron Ore Mining Company (NIOMCO), Itakpe, Kogi State – North Central, Nigeria). *The International Journal of Engineering and Science (IJES)*, 2018, vol. 7, no. 9, III, pp. 47–54. DOI: 10.9790/1813-0709034754.
17. Agyeman P.C., John K., Kebonye N.M., Boruvka L., Vašát R., Drábek O., Nemecek K. Human health risk exposure and ecological risk assessment of potentially toxic element pollution in agricultural soils in the district of Frydek Místek, Czech Republic: a sample location approach. *Environmental Sciences Europe*, 2021, vol. 33, no. 1, 137. DOI: 10.1186/s12302-021-00577-w.
18. Otieno S.B., Ngumbi E., Odhiambo-Nyan'gaya C., Gakunju J. Study of spatial distribution of potentially toxic elements in a nature reserve in Langata Ecosystem. *Journal of Health and Environmental Research*, 2020, vol. 6, no. 4, pp. 114–118. DOI: 10.11648/j.jher.20200604.12.
19. Reyes A., Thiombane M., Panico A., Daniele L., Lima A., Di Bonito M., De Vivo B. Source patterns of potentially toxic elements (PTEs) and mining activity contamination level in soils of Taltal city (Northern Chile). *Environmental Geochemistry and Health*, 2020, vol. 42, no. 8, pp. 2573–2594. DOI: 10.1007/s10653-019-00404-5.
20. Rebrov V.G., Gromova O.A. *Vitamins, macro- and micronutrients*. Moscow, GEOTAR Media Publ., 2008. 960 p.
21. Yurgenson G.A., Filenko R.A. About genetic connection of geochemical specialization of wastes of mining production with ore-formation accessories of ore deposits on the example of Transbaikalia. *Geosphere Research*, 2018, no. 4, pp. 21–31. (In Russ.) DOI: 10.17223/25421379/9/3.
22. Tikhonova E.V., Bisharova G.I. Causes of goitre transformation of thyroid gland in preschool children of Baley city. *Byulleten' vostochno-sibirskogo nauchnogo tsentra sibirskogo otdeleniya rossiyskoy akademii meditsinskikh nauk*, 2005, no. 4 (42), pp. 137–138. (In Russ.)

23. Abramov B.N., Eremin O.V., Filenko R.A., Tsyrenov T.G. Assessment of potential environmental hazards of natural and man-made complexes of ore deposits (Eastern Transbaikalia, Russia). *Geosphere Research*, 2020, no. 2, pp. 64–75. (In Russ.) DOI: 10.17223/25421379/15/5.
24. Abramov B.N. Toxicity assessment of mine tailings ponds in Transbaikalia. *Mining informational and analytical bulletin (scientific and technical journal)*, 2021, no. 11, pp. 136–145. (In Russ.) DOI: 10.25018/0236_1493_2021_11_0_136.
25. Abramov B.N. Geocological characteristics of natural-technogenic complexes of lead-zinc deposits in the Eastern Transbaikalia. *Proceedings of Voronezh state university. Series: geology*, 2022, no. 1, pp. 67–76. (In Russ.) DOI: 10.17308/geology.2022.1/9101.
26. Abramov B.N., Tsyrenov T.G. Patterns of toxic element distribution in soils of settlements in the Eastern Transbaikalia mining areas. *Geokologiya. Inzheneraya geologiya, gidrogeologiya, geokriologiya*, 2022, no. 5, pp. 1–10. (In Russ.) DOI: 10.31857/S0869780922050022.
27. Bondarevich E.A., Kotsyurzhinskaya N.N., Voychenko A.A., Voychenko T.Yu., Leskova O.A., Leskov A.P. The state of the soil cover in the areas of technogenic biogeochemical anomalies in Transbaikalia region. *Advances in current natural sciences*, 2020, no. 3, pp. 57–64. (In Russ.) DOI: 10.17513/use.37346.
28. Solodukhina M.A., Bondarevich E.A., Mikhailova L.A., Vitkovsky Yu.A., Filenko R.A. Ecological and geochemical assessment of the distribution of toxic elements in the soil cover in the impact zone of a mining and processing plant (using the example of the Khapcheranginsky mining and processing plant (Transbaikalia Territory)). *Geosphere Research*, 2021, no. 1, pp. 87–93. (In Russ.) DOI: 10.17223/25421379/18/7.
29. Myazin V.P., Mikhailutina S.I. Integrated assessment of anthropogenic contamination of soil and foodstuffs with heavy metals at the disposal of tailing dumps in Eastern Transbaikalia. *Gorny informatsionno-analiticheskiy byulleten*, 2006, no. 9, pp. 164–170. (In Russ.)
30. Mikhailenko V.N. Problem of technogenic mining waste in Transbaikalia. *Gorny informatsionno-analiticheskiy byulleten*, 2006, no. 2, pp. 121–123. (In Russ.)
31. Mikhailutina S.I. *Complex ecological and geochemical assessment of heavy metal pollution of natural environment components of mining settlements in Eastern Transbaikalia*. Cand. Dis. Abstract. Irkutsk, 2007. 21 p.
32. Pitsyn A.B. Problems of technogenic deposits development in Transbaikalia. *Geology and mineral resources of Siberia*, 2014, no. S3-2, pp. 128–130. (In Russ.)
33. *State Standard 70281-2022 Environmental protection. Soils. Classification of chemical substances for pollution control*. Moscow, Russian Standards Publ., 2022. 8 p. (In Russ.)
34. *Methodological guidelines 2.1.7.730-99 Soil, cleaning of settlements, domestic and industrial waste, sanitary protection of soil. Hygienic assessment of the quality of soil in populated areas*. Moscow, Federal Centre of Gosanepidnadzor of the Ministry of Health of Russia Publ., 1999. 20 p. (In Russ.)
35. Vinogradov A.P. *Geochemistry of rare and diffuse chemical elements in soils*. Moscow, Akad. of Sciences of the USSR Publ., 1957. 238 p. (In Russ.)
36. Alekseenko V.A., Alekseenko A.V. *Chemical elements in geochemical systems. Clarks of soils of residential areas*. Rostov n/D, Southern Federal University Publ., 2013. 380 p. (In Russ.)
37. Müller G. Index of geoaccumulation in sediments of the Rhine River. *GeoJournal*, 1969, vol. 2, no. 3, pp. 108–118.
38. *SanPiN 1.2.3685-21 Hygienic norms and requirements to ensure the safety and (or) harmlessness to humans of environmental factors*. Moscow, Rospotrebnadzor Publ., 2021. 469 p. (In Russ.)
39. Crommentuijn T., Sijm D., Bruijn J.D., Hoop M.V.D., Leeuwen K.V., Plassche E.V.D. Maximum permissible and negligible concentrations for metals and metalloids in The Netherlands, taking into account background concentrations. *Journal of Environmental Management*, 2000, vol. 60, no. 2, pp. 121–143. DOI: 10.1006/jema.2000.0354.
40. Kovalsky V.V. *Geochemical ecology*. Moscow, Nedra Publ., 1974. 303 p. (In Russ.)

Information about the authors

Bair N. Abramov, Dr. Sc., Leading Researcher, Institute of Natural Resources, Ecology and Cryology, Siberian Branch of Russian Academy of Sciences, 16a, Nedorezov street, Chita, 672014, Russian Federation; b_abramov@mail.ru; <https://orcid.org/0000-0002-8905-1677>

Timur G. Tsyrenov, Junior Researcher, Institute of Natural Resources, Ecology and Cryology, Siberian Branch, Russian Academy of Sciences, 16a, Nedorezov street, Chita, 672014, Russian Federation; master.of.pistols@mail.ru; <https://orcid.org/0000-0002-6058-164X>

Natalia Yu. Mikheeva, Junior Researcher, Institute of Natural Resources, Ecology and Cryology, Siberian Branch, Russian Academy of Sciences, 16a, Nedorezov street, Chita, 672014, Russian Federation; natstep6565@mail.ru

Roman A. Filenko, Researcher, Institute of Natural Resources, Ecology and Cryology, Siberian Branch, Russian Academy of Sciences, 16a, Nedorezov street, Chita, 672014, Russian Federation; filrom@yandex.ru; <https://orcid.org/0000-0001-6736-9556>

Marat T. Usmanov, Researcher, Institute of Natural Resources, Ecology and Cryology, Siberian Branch, Russian Academy of Sciences, 16a, Nedorezov street, Chita, 672014, Russian Federation; usgi@yandex.ru; <https://orcid.org/0000-0003-4676-6741>

Received: 12.09.2023

Revised: 15.07.2024

Accepted: 09.09.2024

УДК 624.131

DOI: 10.18799/24131830/2024/9/4771

Шифр специальности ВАК: 1.6.7

Природные и антропогенные факторы, обуславливающие активность геологических процессов территории Абаканской агломерации

Л.А. Строкова¹✉, Д.Ю. Сагалаков^{1,2}

¹ Национальный исследовательский Томский политехнический университет, Россия, г. Томск

² Общество с ограниченной ответственностью «Экспертиза Недвижимости», Россия, г. Абакан

✉sla@tpu.ru

Аннотация. Актуальность. В результате строительства и эксплуатации зданий и сооружений в пределах Абаканской агломерации происходит активизация существующих и образование новых инженерно-геологических процессов, сопровождаемых аварийными разрушениями сооружений. Для минимизации экономических и социально-экологических ущербов необходима своевременная разработка научно обоснованных градостроительных и архитектурно-планировочных решений, в которых бы учитывались результаты проектных проработок инженерной защиты территории от опасных проявлений инженерно-геологических процессов. Обобщение имеющихся результатов изысканий с целью типизации инженерно-геологических условий городской территории позволит оптимизировать строительное освоение городских территорий, разработать надежные схемы инженерной защиты от проявлений опасных инженерно-геологических процессов. **Целью** работы является установление природных и антропогенных факторов, обуславливающих активность опасных геологических процессов территории Абаканской агломерации. **Методы.** Сбор, систематизация и анализ имеющихся территориальных геологических, гидрологических, гидрогеологических, экологических сведений, результатов инженерных изысканий. **Результаты и выводы.** На качественно новом уровне составлен комплект карт по факторам, обуславливающим развитие опасных геологических процессов. Проведен ГИС-анализ морфометрических показателей рельефа территории агломерации: построены карты крутизны и экспозиции склонов. Анализ собранных данных позволил установить региональные особенности компонентов геологической среды и предложить схему зонирования территории для ее строительного освоения и инженерной защиты. При зонировании выделено четыре таксона: территории благоприятные для строительства, не требующие значительных работ по инженерной подготовке; территории условно благоприятные для строительства, требующие предварительной инженерной подготовки; территории условно неблагоприятные для строительства, требующие значительных затрат на инженерную подготовку; территории неблагоприятные для строительства. Границы таксонов проведены на основе анализа геоморфологических особенностей территории. Проведенное исследование выполнено для территории агломерации впервые.

Ключевые слова: инженерно-геологическое районирование, картографирование, опасные инженерно-геологические процессы, оползни, подтопление, оврагообразование, заболачивание

Для цитирования: Строкова Л.А., Сагалаков Д.Ю. Природные и антропогенные факторы, обуславливающие активность геологических процессов территории Абаканской агломерации // Известия Томского политехнического университета. Инжиниринг георесурсов. – 2024. – Т. 335. – № 9. – С. 94–106. DOI: 10.18799/24131830/2024/9/4771

UDC 624.131

DOI: 10.18799/24131830/2024/9/4771

Natural and anthropogenic factors that determine the activity of geological processes of the Abakan agglomeration

L.A. Strokova¹✉, D.Yu. Sagalakov^{1,2}

¹ National Research Tomsk Polytechnic University, Tomsk, Russian Federation

² Limited Liability Company "Real Estate Expertise", Abakan, Russian Federation

✉sla@tpu.ru

Abstract. Relevance. As a result of the construction and operation of buildings and structures within the Abakan agglomeration, there is an activation of existing and the formation of new engineering and geological processes accompanied by accidental destruction of constructions. In order to minimize economic and socio-environmental damage, timely development of scientifically sound urban planning and architectural planning solutions is necessary. It would take into account the results of design studies of engineering protection of the territory from dangerous manifestations of engineering and geological processes. Generalization of the available survey results in order to typify the engineering and geological conditions of the urban area will optimize the construction development of urban areas, develop reliable schemes of engineering protection against the manifestations of dangerous engineering and geological processes. **Aim.** To establish natural and anthropogenic factors that determine the activity of dangerous geological processes in the territory of the Abakan agglomeration. **Methods.** Collection, systematization and analysis of available territorial geological, hydrological, hydrogeological, environmental information, results of engineering surveys. **Results and conclusions.** At a qualitatively new level, a set of maps has been compiled on the factors that determine the development of dangerous geological processes. The authors have carried out a GIS analysis of morphometric indicators of the relief of the agglomeration territory: maps of the steepness and exposure of the slopes were constructed. The analysis of the collected data made it possible to establish the regional characteristics of the components of the geological environment and propose a zoning scheme for the territory for its construction development and engineering protection. The authors identified four taxa during zoning: territories favorable for construction that do not require significant engineering training; territories conditionally favorable for construction, requiring preliminary engineering training; territories conditionally unfavorable for construction, requiring significant costs for engineering training; territories unfavorable for construction. The boundaries of the taxa are based on the analysis of the geomorphological features of the territory. The conducted research was performed for the agglomeration territory for the first time.

Keywords: engineering-geological zoning, mapping, hazardous engineering-geological processes, landslide, water logging, gully erosion, swamping

For citation: Strokova L.A., Sagalakov D.Yu. Natural and anthropogenic factors that determine the activity of geological processes of the Abakan agglomeration. *Bulletin of the Tomsk Polytechnic University. Geo Assets Engineering*, 2024, vol. 335, no. 9, pp. 94–106. DOI: 10.18799/24131830/2024/9/4771

Введение

Развитие территорий сопровождается необходимостью установления зон вероятной активизации опасных геологических процессов (ОГП). Изучению ОГП на территории городов уделяется внимание в работах [1–13]. Виды, интенсивность и размещение ОГП определяются геологическими, геоморфологическими, сейсмическими, гидрологическими и антропогенными факторами.

Цель данного исследования охарактеризовать факторы, обуславливающие формирование и ак-

тивность ОГП на территории Абаканской агломерации, что станет научной основой для их мониторинга и управления.

Исследование проведено весной 2024 г. в отделении геологии Томского политехнического университета (ТПУ), оно включало анализ литературных и фондовых материалов, полученных при инженерно-геологических изысканиях, выполненных различными проектными организациями г. Абакана в последние 20 лет, их обобщение и районирование. Научная значимость исследования состоит в

том, что получены новые результаты (новые знания) о пространственной дифференциации геологических процессов региона, представлены пространственные особенности компонентов геологической среды. Практическая значимость заключается в использовании результатов для строительного освоения территории.

Основные факторы, определяющие активность ОГП

Территория исследования находится в центральной части Южно-Минусинской впадины. Район экономически развит. Помимо предприятий тяжелой и легкой промышленности здесь представлена горнодобывающая отрасль – угольные разрезы и шахты. Города Черногорск, Абакан и Минусинск образуют крупную Абаканскую агломерацию. Абаканская (Абакано-Минусинская, Южно-Сибирская) агломерация – полицентрическая, имеет численность населения от 350 до 700 тыс. жителей. Одна из немногих в стране агломерация имеет своей особенностью межрегиональность, так как включает поселения из Красноярского края (г. Минусинск, пос. Зелёный Бор, пос. Селиваниха и др.) и республики Хакасия (г. Абакан, г. Черногорск, пгт. Усть-Абакан, п. Белый Яр, село Подсинее и др.). Населенные пункты связаны сетью автомобильных и железных дорог, соединяющих Хакасию с Красноярским краем, Иркутской и Кемеровской областями и Республикой Тыва [14].

Природные условия Южно-Минусинской котловины определяются горно-котловинным рельефом и расположением в центральной части материка. Для территории характерно разнообразие природно-климатических условий, отличающихся резко континентальным климатом с недостаточным увлажнением [15].

Рельеф территории котловины имеет форму чаши. На юге и юго-востоке она ограничена северными склонами Западного Саяна, на западе – Абаканским хребтом и отрогами Кузнецкого Алатау, на востоке и северо-востоке – отрогами Восточного Саяна. На севере граница котловины проходит по невысоким субширотным хребтам левобережья: Косинский (Азыртал), Оглахты и Подкунинские и правобережья (Байтакский), отделяющим Южно-Минусинскую котловину от Сыдо-Ербирской. Общая площадь котловины составляет 19000 км², максимальная длина – 210 км, ширина – 100 км. Абсолютные высоты котловины колеблются от 250 м над ур. м. в северной части до 350 м над ур. м. в южной – Койбальская степь, на периферии достигают 500–600 м над ур. м. В целом рельеф котловины неровный, осложненный холмами и грядами, создающими мелкосопочный и куэстово-грядовый облик.

Территория Южно-Минусинской впадины в современное время представляет собой эрозионно-денудационное плато. Глубина расчленения – от 50 до 200 м.

Гидрография Южно-Минусинской котловины представлена речным бассейном Енисея, текущим с юга на север, расчленяющим территорию исследования на две примерно равные части: левобережную и правобережную. Крупными правыми притоками в пределах котловины являются реки Туба и Оя, левыми – Абакан, Ташеба. К северу от Абакана располагается Красноярское водохранилище [15]. Для котловины характерны озера, как пресные, так и соленые, которые имеют тектоническое происхождение.

Климат континентальный умеренно холодный, с резкими сменами климатических сезонов и выраженными колебаниями температуры воздуха в течение сезонов, месяцев и суток, небольшим количеством выпадающих осадков (250–300 мм при испаряемости в 450 мм), небольшой влажностью и сильными ветрами. Среднегодовая температура составляет 0,4 °С. Средняя температура января колеблется от минус 18 до 21 °С. Минимальные температуры достигают минус 52 °С. Средние температуры июля не превышают 20 °С, а максимальные поднимаются до 45 °С. Вегетационный период продолжается 155–165 дней, а безморозный – 120–125 дней. Осадки в котловине выпадают преимущественно в июле–августе и носят ливневый характер. Снежный покров обычно ложится на мерзлую почву и достигает своей наибольшей мощности (10–18 см) в феврале. Сухой и рыхлый снег легко сдувается ветром с повышенных элементов рельефа. В степных районах Минусинской котловины разрушение устойчивого снежного покрова происходит в третьей декаде марта. Максимальные запасы снега обычно формируются в степях котловины в феврале, а величина их колеблется от 0 до 30 мм.

Растительность к западу от Енисея степная, к востоку лесостепная. Заметную роль в распределении осадков играет и форма подстилающей поверхности: ее неровности обуславливают неравномерное распределение тепла и осадков на склонах разных экспозиций: теплообеспеченность больше на южных склонах, а влагообеспеченность на северных. Таким образом, климат Минусинских котловин обусловлен их широтным положением, влиянием барьерных горных сооружений Кузнецкого Алатау и Восточного Саяна, а также особенностями мезо- и микрорельефа [16].

Геологическое строение. Возрастной диапазон стратифицированных образований охватывает период от раннего рифея до голоцена включительно [14].

В пределах района находятся фрагменты четырех крупных структурных единиц Саяно-Алтайской складчатой области: горно-складчатых сооружений Кузнецкого Алатау, Западного и Восточного Саян, сложенных протерозойско-раннепалеозойскими породами, а также Минусинского межгорного прогиба, выполненного отложениями среднего, верхнего палеозоя и кайнозойскими образованиями. Фрагменты горно-складчатых сооружений слагают нижний структурный этаж, фрагменты герцинского Минусинского межгорного прогиба формируют систему впадин, наложенных на складчатое основание нижнего этажа и образующих верхний структурный этаж. Впадины сложены в основном континентальными вулканогенными и терригенными породами, а выше по разрезу – карбонатными, красноцветными и серо-цветными угленосными молассами мощностью 6–7 км, которые дислоцированы и образуют синклинальные прогибы и антиклинальные поднятия мульды и купола.

Начиная с плиоцена и на протяжении всей четвертичной системы на территории существенно проявились движения неотектонического этапа тектогенеза. Широкое развитие, особенно в горных районах, получила разрывная тектоника.

По данным Л.К. Зятковой [17], глубина залегания палеозойских пород не превышает 150 м, а верхняя часть осадочного заполнения впадины представлена олигоцен-миоценовыми глинами, плиоценовыми глинами и суглинками с прослоями торфа, нижнечетвертичными галечниками, песками и глинами, среднечетвертичными лессовидными суглинками и супесями и верхнечетвертичными песчано-галечными отложениями террас.

Минусинская котловина длительное время являлась областью соленых аккумуляций [14]. Процесс соленакопления с различной степенью интенсивности продолжался в течение третичного и четвертичного периодов. В настоящее время на ее территории значительное распространение получили процессы выщелачивания и перераспределения солей.

Характерной особенностью рельефа Южно-Минусинской котловины является наличие большого количества песчаных массивов. Они залегают на террасовом комплексе, на склонах и водоразделах. Выделяются как закрепленные растительностью массивы, так и перевеиваемые пески. Песчаные массивы достигают в длину 60 км при максимальной ширине 10 км.

Покровными отложениями являются золотые лессы, супеси, пески, реже озерно-болотные илы, суглинки, глины. Первый комплекс пород размываем, перевеиваем, возможно образование суффозионных, просадочных воронок. В поймах рек, в предгорных депрессиях отмечается заболачивание.

Гидрогеологические условия. Южно-Минусинский адартезианский бассейн в структурно-тектоническом отношении соответствует Южно-Минусинской палеозойской впадине [14]. Формирование подземных вод бассейна происходит в условиях снижения количества атмосферных осадков, наличия соленосных фаций в составе водосодержащих пород, развития континентального засоления грунтовых вод. Химический состав подземных вод формируется при региональном питании со стороны горного обрамления и местных областей питания.

Водоносный современный аллювиальный горизонт (aQ_n) распространен в поймах крупных речных долин Енисея, Абакана, Тубы, Оя и их притоков. Водовмещающими породами являются гравийно-галечниковые, иногда с отдельными валунами отложения с песчаным, гравийно-песчаным заполнителем, местами с прослоями и слоями супесей и суглинков. Мощность горизонта колеблется от первых метров до 16,5 м, глубина залегания уровня подземных вод до 2–7 м. Подземные воды пресные с минерализацией от 0,2 до 0,5 г/дм³, гидрокарбонатные кальциевые.

Водоносный четвертичный аллювиальный горизонт (aQ) развит на площади речных долин, их надпойменных террас. Водовмещающими породами являются гравийно-галечниковые отложения с песчаным и супесчаным заполнителем. Мощность горизонта от 5 до 35 м. Подземные воды безнапорные, со свободной поверхностью, глубина залегания уровня изменяется от 2,3 до 15,6 м. Фильтрационные свойства высокие, химический состав подземных вод гидрокарбонатный, смешанный по катионам, минерализация 0,3...0,6 г/л.

Водоносный нижнекаменноугольный комплекс (C_1) широко распространен в пределах бассейна, водовмещающими являются трещиноватые песчаники, туфы, алевролиты с прослоями известняков. Вскрытая мощность до 160 м, глубина залегания подземных вод от первых метров до 100–120 м. Воды со свободной поверхностью и напорные. Водообильность пород слабая, химический состав гидрокарбонатный, смешанный по катионам, воды пресные.

Водоносный верхнедевонский горизонт (D_3) приурочен к трещиноватым песчаникам, алевролитам с прослоями и линзами аргиллитов, известняков, конгломератов. Подземные воды вскрываются на глубине до 200 м. Воды напорные. Водообильность отложений по площади крайне неравномерна. Химический состав гидрокарбонатный, смешанный по катионам, минерализация 0,3–0,6 г/л.

Водоносный среднедевонский комплекс (D_2) распространен на юге впадины, в долинах небольших рек и связан с карбонатно-терригенными трещиноватыми известняками и алевролитами с прослоями аргиллитов и конгломератов. Мощность

горизонта определяется глубиной развития трещиноватости и составляет 50–90 м. Глубина залегания от 3 до 115 м. Воды напорные. Водообильность отложений находится в тесной связи с литологическим составом. Химический состав от гидрокарбонатного до сульфатного натриевого и магниевое, минерализация 0,7–2,7 г/л.

К опасным геологическим процессам на территории относятся такие процессы, как подтопление, морозное пучение, просадочность, сейсмичность.

Подтопление. Процесс подтопления имеет широкое распространение. Негативное воздействие процессов выражено в заполнении грунтовой водой погребов, подвалов, заболачивании понижений, приусадебных участков, деформациях дорог и фундаментов домов. Наибольшее площадное распространение имеют процессы подтопления в г. Абакане. Это связано с расположением южной части города на поверхности первой надпойменной террасы и поймы р. Абакан, вблизи устья реки, для которой характерно неглубокое залегание грунтовых вод. Западная и северо-западная часть города расположены на берегу р. Енисей, режим которого существенно изменен в связи с созданием Красноярского водохранилища. Практически вся городская территория находится в зоне подпора грунтовых вод, развитой в связи с заполнением водохранилища. Подтоплению подвержены как старые районы города, так и вновь застраиваемые районы. Глубина залегания подземных вод изменяется от 1 до 5 м (рис. 1, а). Основное питание аллювиальный водоносный горизонт получает от атмосферных осадков. Наряду с выпадением осадков на режим подземных вод значительное влияние оказывают и реки Абакан, Ташеба. Для защиты города от паводков построены инженерные защитные сооружения в виде дамб и дренажных каналов.

Активно развиты процессы подтопления и на территории г. Черногорска. Наблюдения за уровнями грунтовых вод в южной и юго-восточной частях города в 2019 г. проводились по четырем наблюдательным скважинам в северо-западной части города, по ул. Чернышевского и Белинского – по данным обследования колодцев, погребов в частных усадьбах. Общая площадь подтопленной территории города составляла 0,12 км², уровни грунтовых вод залегают на глубине от 1,7 до 5,5 м, в среднем – 2,2 м. Состав горных пород, в которых развиваются процессы подтопления, представлен комплексом четвертичных галечных, галечно-щебнистых отложений с песчаным и суглинистым заполнителем. Несмотря на дефицит осадков, наблюдалось подтопление поселка Солнечный Усть-Абаканского района, вызванное строительством пруда-накопителя УР «Абаканский» в непосредственной близости от населенного пункта [18].

В г. Минусинске уровни грунтовых вод колеблются от 1 до 2,5 м. По данным отдела ГО и ЧС г. Минусинска в 2018 г. было подтоплено более 700 подворий частного сектора, а площадь подтопления достигала 14 км². В 2022 г. в домах по ул. Утро Сентябрьское, Шушенская, Геодезистов, Глушкова, Ойская вода в подпольях отмечалась в апреле–мае, в первой половине июня ушла. Для понижения уровней грунтовых вод в городе проводится строительство коллектора для откачки воды в систему городской канализации.

Морозное пучение. Температура воздуха зимой в Минусинской котловине более низкая, чем в соседних окружающих районах. Район характеризуется продолжительной суровой зимой и коротким, но жарким летом. Нормативная глубина промерзания достигает трех метров. Фронт промерзания местами достигает, а местами проходит ниже уровня подземных вод, что приводит к интенсивной миграции влаги к границе промерзания. Силы морозного пучения развиты наиболее сильно в зонах контакта пылевато-глинистых грунтов и уровня подземных вод, при этом наблюдается напорная миграция влаги к фронту промерзания. Наименьшее воздействие сил морозного пучения наблюдается в районах, в которых пучинистые пылевато-глинистые грунты подстилаются гравийно-галечниковыми грунтами с песчаным заполнителем и кровлей выше уровня подземных вод.

Сейсмичность. Впервые территория вошла в зону 7 баллов и выше в 2000 г. в результате принятия карт общего сейсмического районирования ОСР-97 [19]. Согласно ОСР-2015, г. Абакан, относится к 7-балльной зоне по картам ОСР-2015-А и ОСР-2015-В, но к 8-балльной зоне по карте ОСР-2015-С. Данное изменение повлекло за собой принятие дополнительных антисейсмических мероприятий при проектировании зданий и сооружений. Однако большое количество зданий и сооружений были спроектированы и построены до введения сейсмической зоны 7–8 баллов. К примеру, после сейсмического события 10 февраля 2011 г. магнитудой 5,5 балла здание терапевтического корпуса Республиканской больницы в г. Абакане получило деформации стен в виде трещин, и его пришлось снести в 2013 г. Карта сейсмического микрорайонирования агломерации по настоящее время не разработана.

Просадочность. Для территории характерно распространение просадочных грунтов мощностью не более 1–1,5 м, в связи с этим не возникают сложности при строительном освоении. Данные грунты при строительстве прорезаются фундаментами, или выполняется их замещение.

Оврагообразование характерно для логов и балок, днища которых сложены нелитифицированными кайнозойскими отложениями. Процесс при-

обретает ускорение при распаивании почвенно-растительного закрепляющего слоя. Таковыми являются лога Сухая Чея, Чея, Шишкин Лог, Харасут и др. Высокая активность процессов овражной эрозии наблюдалась в 2019 г. в п. Пригородный Минусинского района [18]. Здесь развиваются три оврага со средней скоростью 2 м/год. На сельскохозяйственных угодьях массива Спартак, в 6 км восточнее окраины п. Мал. Минуса, на протяжении почти 400 м развивалась группа небольших оврагов и промоин. Процесс овражной эрозии был достаточно активным (рис. 1, б). Активное развитие овражной эрозии также наблюдалось на уч. Суходол и уч. Кубеково.

Гравитационные процессы характерны для горных районов. Процессы гравитационно-эрозионного комплекса развиваются в береговых зонах рек и водохранилищ. Активность и масштабы проявлений зависят от гидрологических показателей по-

верхностного водоема – интенсивности паводка, уровня режима водохранилищ [18]. На левом борту р. Абакан, в районе Черногорского водозабора (южная окраина г. Абакан), развиваются гравитационно-эрозионные процессы.

Оползневые процессы зафиксированы в пределах железной и автомобильных дорог, связывающих г. Абакан с Красноярским краем. Так, начиная с 27.09.2003 г. после Алтайского (Чуйского) землетрясения (магнитуда 7,3) начали активизироваться оползневые процессы в районе автодороги Абакан–Минусинск в районе с. Подсинея (рис. 1, в) и автодороги Абакан–Минусинск в районе Колягинских холмов перед Братским мостом. Трасса здесь проходит по левому борту долины р. Енисей, высота которого составляет 15–18 м. Здесь по обе стороны трассы на протяжении более 500 м развиваются оползневые процессы в виде отдельных блоков, оплывин различных размеров (рис. 1, г).



а/а



б/б



в/с



г/д

Рис. 1. Проявления геологических процессов: а) подтопление подвала здания Госэкспертизы РХ в г. Абакане (2021 г., Д.Ю. Сагалаков [20]; б) овраг вблизи с. Мал. Минуса; в) оползень на автомобильной дороге Абакан–Подсинея на участке км 7+300 – км 7+600 (2020 г., Д.Ю. Сагалаков, [21]); г) оползень вблизи автомобильной дороги Абакан–Минусинск Р-257 в районе Колягинских холмов [22]

Fig. 1. Manifestations of geological processes: а) flooding of the basement of the State Expertise building in Abakan (2021, D.Yu. Sagalakov [20]; б) a ravine near the village of Mal. Minus; в) landslide on the Abakan–Podsiney highway on the section km 7+300 – km 7+600 (2020, D.Yu. Sagalakov, [21]); д) landslide near the Abakan–Minusinsk R-257 highway in the area of the Kolyaginsky hills [22]

В 2020 г. были проведены инженерные изыскания в рамках проекта реконструкции участка дороги Абакан–Минусинск в районе с. Подсинее [20]. В ходе данных работ установлено, что по механизму смещения пород оползень можно отнести к оползням сдвига (скольжения). Подтип оползневых процессов консективный (соскальзывающий). Область распространения склонового процесса по площади занимает 5672 м², глубина захвата оползневого тела находится в интервале глубин 1,6–7,4 м. Категория опасности природных воздействий по СП 115.13330.2016 по оползневым процессам – весьма опасные. По результатам проведенного расчета устойчивости склона [21] с учетом фильтрационно-го давления (вызванного наличием подземных вод), сейсмичности площадки изысканий (7 баллов карта А ОСР-2015) установлено, что коэффициент устойчивости (запаса) равен $K_u=0,985<1$. Условие равновесия не выполнено. Основной причиной активации оползневого процесса является наличие ослабленных зон в основании дорожной насыпи, образованных длительным увлажнением грунтов подземными водами. Также на развитие оползневого процесса влияет наклонное залегание слоев природных грунтов. К дополнительным факторам развития оползневого процесса можно отнести постоянные динамические воздействия от железнодорожного транспорта. Линия железной дороги проходит в 20 м от тела оползня. По результатам проведенных проектно-изыскательских, строительно-монтажных работ с геотехническим сопровождением, оползнеопасный участок автомобильной дороги был ликвидирован, однако остался участок вблизи железной дороги с очагами оползневого процесса [21].

Заболачивание приурочено к низким пологим или ровным формам рельефа и связано с отсутствием фильтрации и активного стока поверхностных вод, а также с подпиткой подземными и выклинивающимися грунтовыми водами в основаниях прилегающих склонов. Незначительные по площади низинные болота развиты вдоль берегов крупных озер в урочище Сорокоозерки, в широких поймах рек и мелких речек. Болота ровные, иногда кочковатые, с небольшими буграми. На местах высыхающих болот наблюдается засоление почвы [22].

Процесс активной аккумуляции аллювиальных отложений ярко проявлен на левом берегу р. Абакан, где река имеет широкую пойму, сложное меандрирующее русло и отлагает переносимый терригенный материал в пойме и на низких террасах. Эоловая аккумуляция широко распространена в урочищах Пески–Бюрек, Пески–Алексей Бюрек, локально проявлена в Краснополье, Березовке и Потрошиловской лесной даче, связана с ветровой эрозией.

Техногенез. Первые поселения появились здесь в XII–VIII тысячелетии до н.э. На протяжении веков происходит смена типов хозяйствования. Различный спектр типов хозяйственной деятельности обусловлен природными особенностями и условиями территории. В низкогорьях развивалось яллагное скотоводство, земледелие, добыча и выплавка металла, а на равнинных территориях – ирригационное земледелие, ремесла. В настоящий период идет наиболее интенсивное преобразование территории, характеризующееся изменением отраслевой структуры хозяйства с аграрной на индустриальную. Также увеличилось число населенных пунктов. В 226 населенных пунктах Южно-Минусинской котловины проживает 801706 человек, из которых 74,4 % являются городскими жителями. При этом в правобережной части – 90 населенных пунктов (1 город, 17 поселков, 24 деревни и 48 сел), а в левобережной располагается 136 населенных пунктов, в том числе: 3 города, 10 поселков и поселков городского типа, 44 деревни, 42 села и 37 аалов, в которых проживает 596900 человек.

Горнодобывающие предприятия преимущественно сосредоточены в левобережье, занимаются добычей угля, барита, бентонитовых глин.

Методика исследования

Методика исследования основывается на схемах типологического районирования, разработанных И.В. Поповым, Г.А. Голодковской, В.Т. Трофимовым [23], Г.А. Сулакшиной, Т.Я. Емельяновой, Л.А. Строковой [24]. Технология выполнения типологического районирования включает ряд последовательных операций: определение границы территории (объекта); изучение объекта; выбор классификационных признаков типизации; их ранжирование по степени значимости; разделение рассматриваемой территории (объекта) по принятым признакам; построение итоговой карты районирования территории.

Результаты исследования

Наше исследование включало анализ литературных и фондовых материалов, установление принципов и методики районирования, картографирование. Вначале были собраны и проанализированы имеющиеся опубликованные и фондовые материалы и разработана концепция районирования. В качестве источников информации для составления карты отобраны данные: региональных геологических исследований района, инженерно-геологических изысканий за 2002–2024 гг.

Для создания карты районирования в ArcGIS были построены информационные слои факторов, представленные на рис. 2.

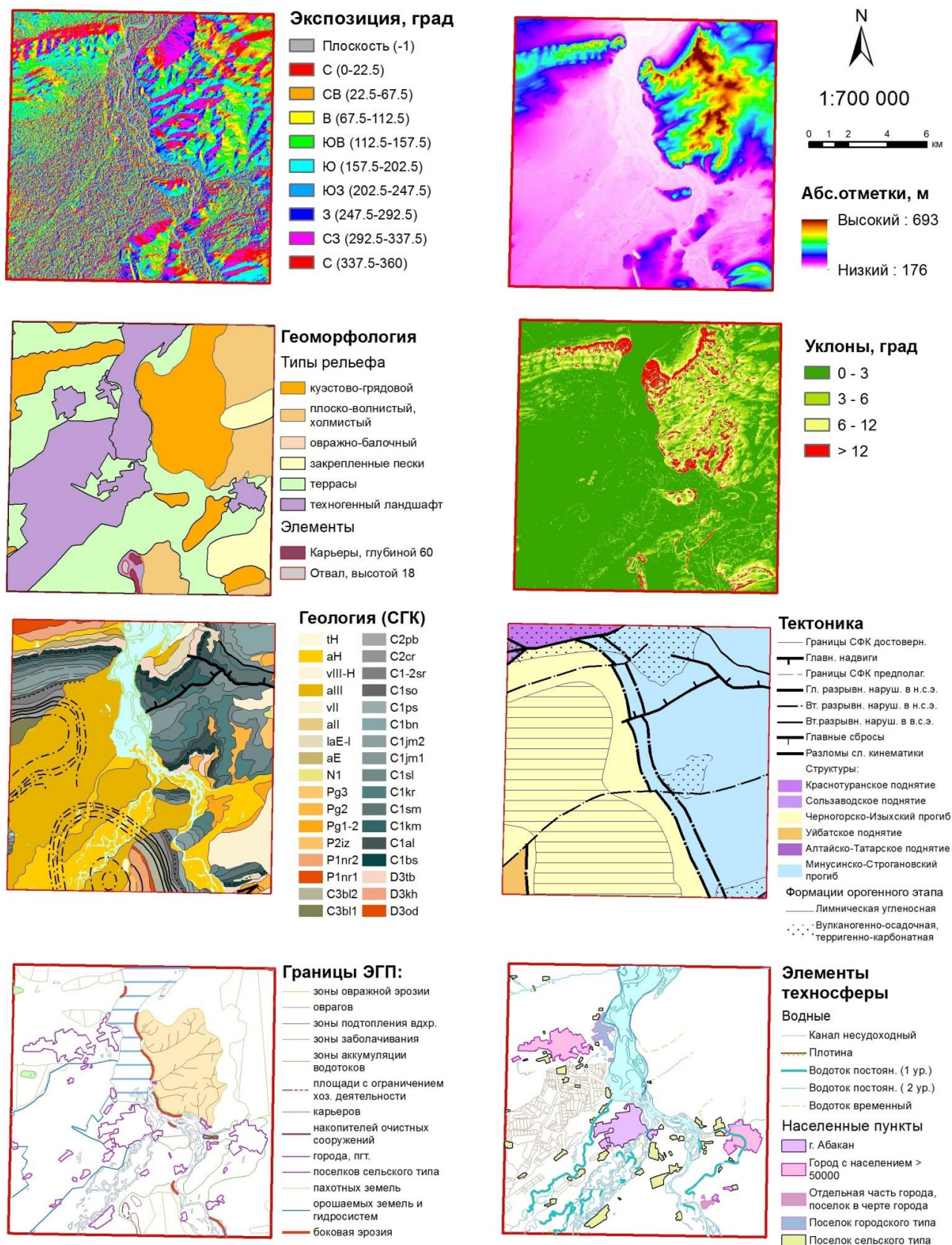


Рис. 2. Факторы и зоны развития геологических процессов
Fig. 2. Factors and zones of development of geological processes

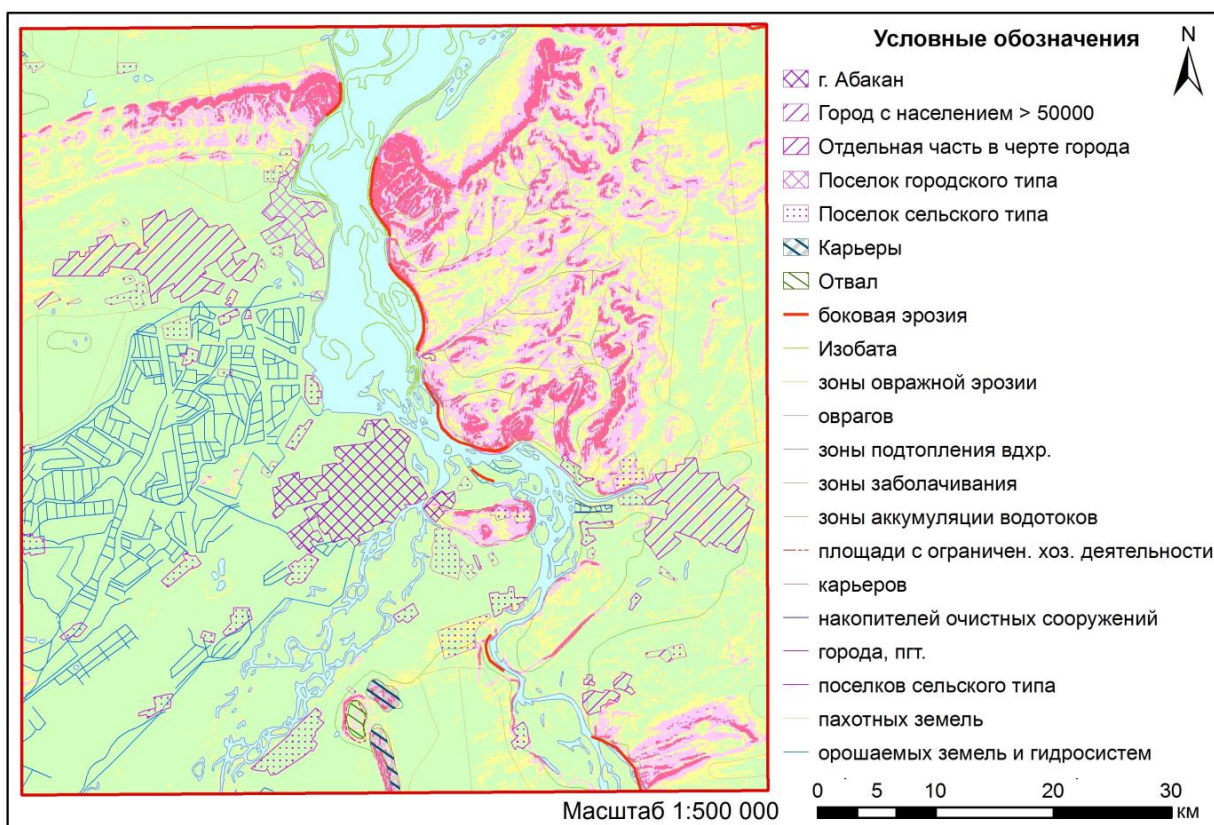


Рис. 3. Схема зонирования территории для строительного освоения
Fig. 3. Zoning scheme of the territory for construction development

Таблица. Характеристика таксонов зонирования
Table. Characteristics of zoning taxa

Таксон Taxon	Состояние объекта Object state	Геоморфологическая позиция Geomorphological position	Геологическое строение Geological structure	Процессы и явления Processes and phenomena
I – благоприятные для строительства, не требующие значительных работ по инженерной подготовке favorable for construction, not requiring significant engineering preparation	Относительно устойчивые Relatively stable	Относительно плоские поверхности до 3° Relatively flat surfaces up to 3°	Участки, сложенные супесью, щебнем, дресвой Areas composed of sandy loam, crushed stone, and gravel	Суффозия, заболачивание, потенциальное подтопление, морозное пучение Suffusion, swamping, potential water logging, frost heaving
II – условно благоприятные для строительства, требующие предварительной инженерной подготовки conditionally favorable for construction, requiring preliminary engineering preparation	Средней устойчивости Medium stable	Склоны крутизной 3–6° Slopes with a steepness of 3–6°	Участки, сложенные песком с прослоями глин, суглинков, супеси Areas composed of sands with interlayers of clays, loams, sandy loam	Потенциальное подтопление, неравномерная осадка грунтов, оползни Potential water logging, uneven soil settlements, landslides
III – условно неблагоприятные для строительства, требующие значительных затрат на инженерную подготовку conditionally unfavorable for construction, requiring significant costs for engineering preparation	Низкой устойчивости Low stable	Склоны крутизной 6–12° Slopes with a steepness of 6–12°	Участки, сложенные супесями, суглинками с щебнем и дресвой Areas composed of sandy loam, loam with crushed stone and gravel	Потенциальное подтопление, морозное пучение, неравномерная осадка грунтов, оползни, овражная эрозия Potential water logging, frost heaving, uneven soil settlements, landslides, gully erosion
IV – неблагоприятные для строительства unfavorable for construction	Неустойчивые Unstable	Склоны крутизной 12–35°, а также низменные участки Slopes with a steepness of 12–35°, as well as low-lying areas	Валунные глины, пески, галечники. Супеси, суглинки со щебнем и дресвой Boulder clays, sands, pebbles. Sandy loams, loams with crushed stone and gravel	Оползни, осыпи, затопление, подтопление, эрозия, заболачивание морозное пучение, неравномерная осадка грунтов Landslides, scree, flooding, swamping, erosion, water logging, frost heaving, uneven soil settlements

По опыту подобных исследований в мире, изложенных в [1, 6–13], выбраны следующие факторы: геоморфологические (уклон склона, экспозиция, абсолютные отметки поверхности, тип рельефа); геологические (стратиграфо-генетические комплексы и тектонические особенности); геодинамические (зоны развития экзогенных геологических процессов) и антропогенные (зоны размещения гидротехнических сооружений, дорог, населенных пунктов и др.).

Далее информационные слои обрабатывались в ArcGIS для получения карты инженерно-геологического районирования (рис. 3). Основным фактором, контролирующим сложность строительного освоения на уровне агломерации, являются геоморфологические особенности территории, а именно уклоны поверхности. По этому признаку и проведены границы таксонов. Детальная характеристика таксонов приведена в таблице.

Обсуждение результатов исследования

Проведенный анализ литературных и фондовых материалов позволил установить, что для территории характерны гравитационно-эрозионные, оползневые процессы и процессы подтопления. Так, процессы гравитационно-эрозионного комплекса развиваются в береговых зонах рек и водохранилищ. Оползневые процессы встречаются в Алтайском, Богградском и Усть-Абаканском районах. Процессам подтопления подвергаются около 30 населенных пунктов, расположенных в степных и предгорных районах. В их число входят гг. Абакан, Черногорск, Минусинск, пгт. Усть-Абакан, сельские населенные пункты Алтайского, Аскизского, Бейского и Таштыпского районов. Практически вся территория г. Абакана находится в зоне подпора грунтовых вод, развитой в связи с заполнением Красноярского водохранилища. Подтоплению подвержены как старые районы города, так и вновь застраиваемые районы.

Использование ГИС-технологий позволило представить пространственные особенности компонентов геологической среды в едином цифровом формате и выполнить зонирование территории агломерации для строительного освоения. Критерием для выделения таксонов выбран уклон поверхности как фактор, контролирующий развитие наиболее распространенных на территории опасных геологических процессов. Всего выделены четыре таксона с разными степенью благоприятности для строительного освоения и требованиями по инженерной защите.

Для защиты территории от опасных геологических процессов рекомендуются следующие мероприятия на подтапливаемых участках: строительство дренажных сооружений, регулирование стока поверхностных вод, регулирование уровня водных объектов; на участках, подверженных гравитационно-эрозионным процессам, необходимо строительство удерживающих сооружений и конструкций, а также строительство новых и ремонт существующих берегозащитных сооружений.

Основное преимущество предложенной схемы состоит в том, что использованы современные материалы об инженерно-геологических условиях территории, данные дистанционного зондирования, представлены пространственные особенности факторов, обуславливающих развитие опасных геологических процессов. В дальнейшем следует составить карты восприимчивости территории к развитию опасных геологических процессов, каждого в отдельности: к овражной эрозии, оползневой опасности, подтоплению и другим. Составление же единой карты к разным геологическим процессам лишено смысла, т. к. факторы, обуславливающие тот или иной процесс, специфичны и разнонаправлены. Также специфичны будут и защитные мероприятия.

Выводы

1. Рассмотрение основных природных компонентов территории: сейсмотектоники; литологии; топографии; гидрологии, гидрогеологии, показало, что в целом инженерно-геологические условия являются достаточно сложными в связи с широким распространением геологических процессов.
2. Основными факторами, контролирующими активность геологических процессов, являются: геологические, геоморфологические, гидрогеологические и антропогенные.
3. Использование ГИС при зонировании раскрывает относительно доступный и быстрый способ определения взаимосвязи природных и антропогенных параметров с проявлениями геологических процессов с высокой точностью. В региональных исследованиях подобная процедура может быть использована для составления карт восприимчивости территории к развитию опасных геологических процессов и разработки мероприятий для снижения опасности от них для населения и окружающей среды.

СПИСОК ЛИТЕРАТУРЫ

1. Бакина С.В., Бабкин Р.А., Скобеев Н.М. Изменение пространственной уязвимости населения крупных городов к природным и техногенным опасностям под воздействием жилищного строительства // Вестник Санкт-Петербургского университета. Науки о Земле. – 2023. – Т. 68. – № 2. – С. 357–377.
2. Габараев А.Ф. и др. Влияние геоморфологических условий горного региона на интенсивность проявления опасных геологических процессов // Геология и Геофизика Юга России. – 2023. – Т. 13. – № 4. – С. 198–212.
3. Суздаева А.Л., Слесарев М.Ю., Яковлева И.Ю. Опасные геологические процессы на участках объектов незавершенного строительства // Вестник МГСУ. – 2023. – Т. 18. – № 10. – С. 1599–1607.
4. Трофимов В.Т., Королев В.А. Общая классификация геологических процессов для целей инженерной геологии // Вестник Московского университета. Серия 4. Геология. – 2023. – № 4. – С. 99–109.
5. Assessment of the exogeodynamic hazard of catastrophic flash floods on the territory of the Ulaanbaatar Agglomeration / A.A. Rybchenko, E.A. Kozyreva, O.A. Mazaeva, S. Demberel // Geography and Natural Resources. – 2023. – Vol. 44. – Suppl 1. – P. S44–S52.
6. Wu C., Liu W., Deng H. Urbanization and the emerging water crisis: identifying water scarcity and environmental risk with multiple applications in urban agglomerations in Western China // Sustainability. – 2023. – Vol. 15. – № 17. – P. 12977.
7. Quaioco J. Landslide risk and vulnerability; real issues, thoughts and perspectives // Landslide: Susceptibility, Risk Assessment and Sustainability: Application of Geostatistical and Geospatial Modeling. – Cham: Springer Nature Switzerland, 2024. – P. 3–23.
8. Khatibi A., Amiri M., Faghihi M. Integrated analysis of land for the physical development of coastal cities: geotechnical, geological, and environmental perspectives (case study: Bandar Abbas City) // International Journal of Environmental Science and Technology. – 2024. – Vol. 21. – № 10. – P. 7207–7226.
9. Abdelrahman K., Hazaea S.A., Almadani S.A. Geological-geotechnical investigations of the historical Diriyah urban zone in Riyadh, Saudi Arabia: an integrated approach // Frontiers in Earth Science. – 2023. – Vol. 11. – P. 1202534.
10. Aldemir F., Yilmaz E., Akin M. Examples of geological surveys in urban areas using GIS applications // NEVU Journal of Engineering and Architecture. – 2023. – Vol. 1. – № 1. – С. 19–27.
11. Urban land suitability analysis using geospatial techniques and combined weighting approach in Gabes zone, Southeastern Tunisia / D. Souiss, L. Zouhri, A. Sebei, A. Zghibi, M. Dlala, M. Ghanmi // Geomatics, Natural Hazards and Risk. – 2023. – Vol. 14. – № 1. – P. 2278278.
12. Evaluation of Open Geotechnical Knowledge in Urban Environments for 3D Modelling of the City of Seville (Spain) / C. Soriano-Cuesta, R. Romero-Hernández, E.J. Mascort-Albea, M. Kada, A. Fuls, A. Jaramillo-Morilla // Remote Sensing. – 2023. – Vol. 16. – № 1. – P. 141.
13. Three-dimensional quality assessment of urban underground space resource based on multiple geological environmental factors / Y. Yang, R. Wang, D. Liu, L. Wu, J. Su // Applied Sciences. – 2024. – Vol. 14. – № 10. – P. 4046.
14. Государственная геологическая карта Российской Федерации. Масштаб 1:1000000 (третье поколение). Серия Алтае-Саянская. Лист N-46 – Абакан. Объяснительная записка / под ред. Е.П. Миронюк. – СПб.: Картографическая фабрика ВСЕГЕИ, 2008. – 391 с.
15. Павлова Е.В., Махрова М.Л., Ямских Г.Ю. Экологический каркас Южно-Минусинской котловины // СибСкрипт. – 2015. – № 1–2 (61). – С. 90–98.
16. Макунина Н.И. Степи Минусинских котловин // Turczaninowia. – 2006. – Т. 9. – № 4. – С. 112–144. URL: <http://ssbg.asu.ru/turcz/turcz406-112-144.pdf> (дата обращения 01.07.2024).
17. Зятькова Л.К. Структурная геоморфология Алтае-Саянской горной области. – Новосибирск: Наука, 1977. – 215 с.
18. Информационный бюллетень о состоянии недр на территории Сибирского федерального округа в 2019 г. – Вып. 16. – М.: ФГБУ «Гидроспецгеология», 2020. – 401 с.
19. Шибаева Г.Н., Стародубцева Е.С. Сейсмостойкое строительство в Республике Хакасия // Norwegian Journal of Development of the International Science. – 2018. – № 16-2. – С. 3–7. URL: https://nor-ijournal.com/wp-content/uploads/2023/09/NJD_16_2.pdf (дата обращения 01.07.2024).
20. Капитальный ремонт по доведению параметров автомобильной дороги Абакан–Подсине на участке км 7+300 – км 7+600 в Алтайском районе Республики Хакасия до значений, соответствующих ее фактической технической категории, без изменения границ полосы отвода: технический отчет по результатам инженерно-геологических изысканий. – Абакан: ИП Халимов Олег Закирович, 2020. – 113 с.
21. Халимов О.З., Лысакова А.А., Сагалаков Д.Ю. Геотехническое сопровождение реконструируемого оползнеопасного участка дороги Абакан–Подсине на всех этапах жизненного цикла объекта // Развитие дорожно-транспортного комплекса Республики Хакасия 2023–2027: материалы научно-практической конференции. – Абакан: ХТИ – филиал СФУ, 2023. – С. 51–57.
22. Информационный бюллетень о состоянии недр на территории Российской Федерации в 2022 г. – Вып. 46. – М.: ФГБУ «Гидроспецгеология», 2022. – 343 с.
23. Трофимов В.Т. Зональность инженерно-геологических условий континентов Земли. – М.: Изд-во МГУ, 2002. – 348 с.
24. 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.

Информация об авторах

Людмила Александровна Строкова, доктор геолого-минералогических наук, профессор отделения геологии Инженерной школы природных ресурсов, Национальный исследовательский Томский политехнический университет, Россия, 634050, г. Томск, пр. Ленина, 30; sla@tpu.ru; <https://orcid.org/0000-0001-9302-0630>

Дмитрий Юрьевич Сагалаков, аспирант отделения геологии Инженерной школы природных ресурсов Национального исследовательского Томского политехнического университета, Россия, 634050, г. Томск, пр. Ленина, 30; начальник испытательной геостроительной лаборатории Общества с ограниченной ответственностью «Экспертиза Недвижимости», Россия, 655009, г. Абакан, ул. Мартинова, 24; sagalakov_d@mail.ru

Поступила в редакцию: 11.07.2024

Поступила после рецензирования: 30.08.2024

Принята к публикации: 09.09.2024

REFERENCES

1. Baldina S.V., Babkin R.A., Skobeev N.M. Changes in the spatial vulnerability of the population of large cities to natural and man-made hazards under the influence of housing construction. *Bulletin of St. Petersburg University. Earth Sciences*, 2023, vol. 68, no. 2, pp. 357–377. (In Russ.)
2. Gabaraev A.F., Melikov D.A., Kortiev A.L., Kozyrev E.N. The influence of geomorphological conditions of a mountainous region on the intensity of dangerous geological processes. *Geology and Geophysics of the South of Russia*, 2023, vol. 13, no. 4, pp. 198–212. (In Russ.)
3. Suzdaleva A.L., Slesarev M.Yu., Yakovleva I.Yu. Dangerous geological processes at sites of unfinished construction. *Bulletin of the MGSU*, 2023, vol. 18, no. 10, pp. 1599–1607. (In Russ.)
4. Trofimov V.T., Korolev V.A. General classification of geological processes for the purposes of engineering geology. *Bulletin of the Moscow University. Series 4. Geology*, 2023, no. 4, pp. 99–109. (In Russ.)
5. Rybchenko A.A., Kozyreva E.A., Mazaeva O.A., Demberel S. Assessment of the exogeodynamic hazard of catastrophic flash floods on the territory of the Ulaanbaatar Agglomeration. *Geography and Natural Resources*, 2023, vol. 44, pp. 44–52.
6. Wu C., Liu W., Deng H. Urbanization and the emerging water crisis: identifying water scarcity and environmental risk with multiple applications in urban agglomerations in Western China. *Sustainability*, 2023, vol. 15, no. 17, 12977.
7. Quaioco J. Landslide risk and vulnerability; real issues, thoughts and perspectives. *Landslide: Susceptibility, Risk Assessment and Sustainability: Application of Geostatistical and Geospatial Modeling*. Cham, Springer Nature Switzerland, 2024. pp. 3–23.
8. Khatibi A., Amiri M., Faghihi M. Integrated analysis of land for the physical development of coastal cities: geotechnical, geological, and environmental perspectives (case study: Bandar Abbas City). *International Journal of Environmental Science and Technology*, 2024, vol. 21, no.10, pp. 7207–7226.
9. Abdelrahman K., Hazaea S.A., Almadani S.A. Geological-geotechnical investigations of the historical Diriyah urban zone in Riyadh, Saudi Arabia: an integrated approach. *Frontiers in Earth Science*, 2023, vol. 11, 1202534.
10. Aldemir F., Yilmaz E., Akin M. Examples of geological surveys in urban areas using GIS applications. *NEVU Journal of Engineering and Architecture*, 2023, vol. 1, no. 1, pp. 19–27.
11. Souissi D., Zouhri L., Sebei A., Zghibi A., Dlala M., Ghanmi M. Urban land suitability analysis using geospatial techniques and combined weighting approach in Gabes zone, Southeastern Tunisia. *Geomatics, Natural Hazards and Risk*, 2023, vol. 14, no. 1, 2278278.
12. Soriano-Cuesta C., Romero-Hernández R., Mascort-Albea E.J., Kada M., Fuls A., Jaramillo-Morilla A. Evaluation of open geotechnical knowledge in urban environments for 3D Modelling of the City of Seville (Spain). *Remote Sensing*, 2023, vol. 16, no. 1, 141.
13. Yang Y., Wang R., Liu D., Wu L., Su J. Three-dimensional quality assessment of urban underground space resource based on multiple geological environmental factors. *Applied Sciences*, 2024, vol. 14, no. 10, 4046.
14. *The state geological map of the Russian Federation. Scale 1:1000000 (third generation)*. Ed. by E.P. Mironjuk. Series Altai-Sayan Sheet N-46 – Abakan. Explanatory note. St Petersburg, VSEGEI Publ. house, 2008. 391 p. (In Russ.)
15. Pavlova E.V., Makhrova M.L., Yamskikh G.Yu. Ecological framework of the South Minusinsk depression. *Bulletin of Kemerovo State University*, 2015, vol. 61, no. 1 (2), pp. 90–98 (In Russ.)
16. Makunina N.I. Steppes of the Minusinsk basins. *Turczaninowia*, 2006, vol. 9, no. 4, pp. 112–144. (In Russ.) Available at: <http://ssbg.asu.ru/turcz/turcz406-112-144.pdf> (accessed 1 July 2024).
17. Zyatkova L.K. *Structural geomorphology of the Altai-Sayan mountain region*. Novosibirsk, Nauka Publ., 1977. 215 p. (In Russ.)
18. *Information bulletin on the state of the subsoil in the territory of the Siberian Federal District in 2019*. Moscow, Federal State Budgetary Institution "Hydrospetsgeology" Publ., 2020. Vol. 16, 401 p. (In Russ.)
19. Shibaeva G.N., Starodubtseva E.S. Earthquake-resistant construction in the Republic of Khakassia. *Norwegian Journal of Development of the International Science*, 2018, vol. 16, no. 2, pp. 3–7. (In Russ.)
20. Halimov O.Z. *Major repairs to bring the parameters of the Abakan–Podsinee highway on the section km 7+300 – km 7+600 in the Altai region of the Republic of Khakassia to values corresponding to its actual technical category, without changing the boundaries of the right-of-way: technical report on the results of engineering and geological surveys*. Abakan, Khalimov Publ., 2020. 113 p. (In Russ.)
21. Khalimov O.Z., Lyspakova A.A., Sagalakov D.Yu. Geotechnical support of the reconstructed landslide-prone section of the Abakan–Podsinee road at all stages of the object's life cycle. *Development of the road transport complex of the Republic of Khakassia. Proceedings of the International scientific and practical conference*. Abakan, HTI – SFU Branch Publ., 2023. pp. 51–57. (In Russ.)
22. *Information bulletin on the state of the subsoil in the territory of the Russian Federation in 2022*. Moscow, Federal State Budgetary Institution "Hydrospetsgeology" Publ., 2022. Vol. 46, 343 p. (In Russ.)

23. Trofimov V.T. *Zoning of engineering-geological conditions of the earth's continents*. Moscow, Moscow state University Publ., 2002. 348 p. (In Russ.)
24. Strokova L.A. Nadezhdina Yu.Y. 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 Russ.)

Information about the authors

Ludmila A. Strokova, Dr. Sc., Professor, National Research Tomsk Polytechnic University, 30, Lenin avenue, Tomsk, 634050, Russian Federation; sla@tpu.ru, <https://orcid.org/0000-0001-9302-0630>

Dmitry Yu. Sagalakov, Postgraduate Student, National Research Tomsk Polytechnic University, 30, Lenin avenue, Tomsk, 634050, Russian Federation; Head of the Geo-Construction Testing Laboratory, Limited Liability Company "Real Estate Expertise", 24, Martinova street, Abakan, 655009, Russian Federation; sagalakov_d@mail.ru

Received: 11.07.2024

Revised: 30.08.2024

Accepted: 09.09.2024

УДК 620.9:538.9

DOI: 10.18799/24131830/2024/9/4655

Шифр специальности ВАК: 1.3.14

Влияние свойств углеродного компонента на теплофизические характеристики полимерных композиционных материалов для электротехнических устройств

Н.Н. Минакова^{1✉}, В.Я. Ушаков²

¹ Алтайский государственный университет, Россия, г. Барнаул

² Национальный исследовательский Томский политехнический университет, Россия, г. Томск

✉ minakova@asu.ru

Аннотация. *Актуальность* работы обусловлена тем, что полимерные композиционные материалы с углеродными компонентами обладают не только хорошими функциональными характеристиками в качестве резисторов, но и низкой ценой, малым удельным весом, сравнительно простой промышленной технологией изготовления. Это обуславливает расширение сферы их применения, в том числе в материалоемком нефтегазовом оборудовании, в высоковольтных электрофизических и электротехнических установках. Расширение областей применения таких материалов требует исследования теплофизических характеристик и способов управления ими для оптимизации тепловых условий при непрерывной работе оборудования, содержащего компоненты из полимерных композиционных материалов с углеродными наполнителями. Теплофизические характеристики можно формировать за счет широкого спектра параметров; основным из них является вид электропроводящего и связующего компонентов. Однако изменение связующего требует радикального изменения технологии, что не всегда приемлемо по ряду причин. Поэтому актуален анализ вклада электропроводящего компонента в формирование теплофизических характеристик композиционного материала. **Цель:** изучить влияние электропроводящего компонента (технического углерода) на теплофизические характеристики наполненных техническим углеродом каучуков; установить зависимость теплофизических характеристик композита от вида технического углерода. **Методы:** инструментальные измерения теплофизических и электрофизических характеристик материалов, статистический и корреляционный анализ. **Результаты.** Экспериментально установлено, что теплофизические характеристики наполненных техническим углеродом каучуков (теплоемкость, теплопроводность, температуропроводность) зависят от вида технического углерода. Выявлены закономерности изменения этих характеристик. Проанализирована их связь со свойствами технического углерода и характеристиками макроструктуры композиционного материала. На основании проведенных исследований разработаны рекомендации по подбору марки технического углерода для композитов, используемых в таких областях, как: системы электрообогрева, работающие на принципах саморегулирующихся нагревателей, устройства, работающие в нестационарных тепловых режимах, и др.

Ключевые слова: ресурсосбережение, полимерные композиционные материалы с углеродными компонентами, наполненные техническим углеродом эластомеры, метод лазерной вспышки, теплофизические характеристики, коэффициент теплопроводности, удельная теплоемкость, коэффициент температуропроводности, теплопередача

Благодарности: Авторы благодарны инженеру Инженерной школы энергетики Томского политехнического университета Артуру Насырбаеву за помощь в выполнении измерений.

Для цитирования: Минакова Н.Н., Ушаков В.Я. Влияние свойств углеродного компонента на теплофизические характеристики полимерных композиционных материалов для электротехнических устройств // Известия Томского политехнического университета. Инжиниринг георесурсов. – 2024. – Т. 335. – № 9. – С. 107–114. DOI: 10.18799/24131830/2024/9/4655

UDC 620.9:538.9

DOI: 10.18799/24131830/2024/9/4655

Effect of carbon component properties on thermal physical characteristics of polymer composite materials for electrical devices

N.N. Minakova^{1✉}, V.Ya. Ushakov²

¹*Altai State University, Barnaul, Russian Federation*

²*National Research Tomsk Polytechnic University, Tomsk, Russian Federation*

✉ minakova@asu.ru

Abstract. Relevance. Polymer composite materials with carbon components have not only good functional characteristics as resistors, but also low price, low specific gravity, and relatively simple industrial manufacturing technology. This determines the expansion of the scope of their application, including in material-intensive oil and gas equipment, in high-voltage electrical and electrophysical installations. Expanding the areas of application of such materials requires research into thermophysical characteristics and methods for controlling them to optimize thermal conditions during continuous operation of equipment containing components made of polymer composite materials with carbon fillers. Thermophysical characteristics can be formed using a wide range of parameters; the main ones are the type of electrically conductive and connecting components. However, changing the binder requires a radical change in technology, which is not always acceptable for a number of reasons. **Aim.** To study the effect of the electrically conductive component (carbon black) on the thermophysical characteristics of rubbers filled with carbon black; establish the dependence of the thermophysical characteristics of the composite on the type of carbon black. **Object.** Thermophysical characteristics of the composite material, largely determined by the electrically conductive component. **Methods.** Instrumental measurements of thermophysical and electrical characteristics of materials, statistical and correlation analysis. **Results.** The authors have experimentally established that the thermophysical characteristics of rubbers filled with carbon black (heat capacity, thermal conductivity, and thermal diffusivity) depend on the type of carbon black. They identified the patterns of changes in these characteristics. The paper analyzes their relationship with the properties of carbon black and the characteristics of the macrostructure of the composite material. Based on the conducted research, the authors developed the recommendations for selecting the grade of carbon black for composites used in such areas as: electric heating systems operating on the principles of self-regulating heaters, devices operating in non-stationary thermal conditions, etc.

Keywords: resource saving, polymer composite materials with carbon components, carbon black-filled elastomers, laser flash method, thermophysical characteristics, thermal conductivity coefficient, specific heat capacity, thermal diffusivity coefficient, heat transfer

Acknowledgements: The authors are grateful to Artur Nasyrbaev, engineer of School of Energy and Power Engineering at the Tomsk Polytechnic University, for assistance in performing the measurements.

For citation: Minakova N.N., Ushakov V.Ya. Effect of carbon component properties on thermal physical characteristics of polymer composite materials for electrical devices. *Bulletin of the Tomsk Polytechnic University. Geo Assets Engineering*, 2024, vol. 335, no. 9, pp. 107–114. DOI: 10.18799/24131830/2024/9/4655

Введение

Оборудование и устройства, содержащие электропроводящие полимерные композиционные материалы, имеют широкий спектр применения [1–4]. Например, в геологоразведке они используются для изготовления рабочих заземлителей, обеспечивающих безопасную и надежную эксплуатацию оборудования. Для бесперебойных процессов добычи и транспортировки нефти и газа необходимо обеспечивать определённые тепловые условия за счет электрообогрева [5–9]. Одна из инновационных технологий основана на работе самоорганизующихся систем – воздействии внешних факторов, структурирующих систему под решаемую функци-

ональную задачу [3, 7]. За счет положительного температурного коэффициента сопротивления достигается эффект саморегулирования: при росте температуры объемное электрическое сопротивление увеличивается. Вместе с его ростом уменьшается выделяющаяся тепловая энергия. Изделие постоянно находится в тепловом взаимодействии с окружающей средой, меняя свои электрофизические свойства в соответствии с внешними условиями [5].

Практически во всех отраслях Российской экономики предстоит решить такие задачи, как повышение эффективности потребления всех ресурсов, в особенности топливно-энергетических, разработ-

ка и освоение новой техники и технологий для улучшения технико-экономических показателей, новых материалов, сочетающих необходимые функциональные характеристики с требованиями по ресурсосбережению и доступности технологии изготовления [4, 9]. Наполненные техническим углеродом эластомеры удовлетворяют большинству из названных требований [1–3, 9]. Их применение позволяет обеспечивать необходимую электропроводность и формировать тепловые поля сложной формы из-за конструкционной гибкости таких материалов. Процесс электрообогрева регулируется за счет положительного температурного коэффициента сопротивления. Такие материалы отвечают требованиям ресурсосбережения благодаря возможности профилировать изделия сложной формы, их меньшего веса и др. [1, 10]. Электрофизические характеристики таких материалов исследованы в [10, 11].

Известно, что характер электропроводящей сетки зависит от концентрации технического углерода и его вида (свойств удельной поверхности, размера частиц) [1, 2]. Нагрев электрическим током локализуется в частицах электропроводящего компонента, которые могут контактировать как непосредственно друг с другом, так и через прослойки связующего компонента. Их размер и структура формируются за счет межфазных взаимодействий компонентов гетерогенной системы [1, 2].

Тепловое воздействие вызывает внутреннюю реакцию материала, изменяющую его важнейшие свойства: теплопроводность, теплоемкость, температуропроводность [12–14]. Реакция связана во многом с теми же характеристиками, что и электропроводность. Теплофизические характеристики определяются структурной организацией [15–19]. Однако при сходных факторах имеют место различия в механизмах воздействия на компоненты структуры из-за гетерогенности структуры, определяющей проявление широкого спектра физико-химических процессов, закладывающих случайную составляющую. В работе [20] рассмотрены теплофизические характеристики наполненных техническим углеродом эластомеров в зависимости от вида связующего. Вид эластомера определяет технологию переработки изделия, поведение в агрессивной среде и т. д. В этой связи для ряда областей применения композитов регулирование их характеристик изменением вида эластомера нецелесообразно. При выбранном виде эластомера свойства резистивных полимерных композиционных материалов более эффективно регулировать за счет свойств электропроводящего компонента.

В наполненных техническим углеродом эластомерах электропроводящий компонент влияет на упорядочивание макромолекул (на плотность упа-

ковки) и гибкость молекулярных цепей. Взаимодействие эластомера с поверхностью частиц наполнителя влияет на структуру межфазных границ и характер электропроводящей сетки. Происходит модификация физических свойств полимера на границе раздела [1, 21, 22].

При тепловом воздействии диффузионные процессы могут как разрушать электропроводящие каналы, так и дополнять проводящую систему вновь образованными каналами. Повышение температуры приводит к перераспределению частиц вследствие диффузионных процессов. Повышенная температура может ослабить связи «полимер–полимер», «наполнитель–наполнитель», «наполнитель–полимер» [1, 23]. Эти процессы протекают в материале одновременно, но с разной интенсивностью. По этой причине влияние технического углерода, как электропроводящего компонента, на электрофизические и теплофизические характеристики может проявляться по-разному.

Увеличение концентрации электропроводящего наполнителя обычно увеличивает теплопроводность и снижает теплоемкость [1, 14]. Можно полагать, что на интенсивность процессов теплообмена, на теплоизоляционные свойства композита и др. влияет вид технического углерода. Степень этого влияния зависит от многих факторов. Поэтому актуальны экспериментальные исследования теплофизических характеристик каучуков, наполненных техническим углеродом с различающимися свойствами. Авторами данной статьи изучена возможность регулирования теплофизических свойств композита за счет электропроводящего компонента при заданном (неизменном) материале связующей основы.

Объекты и методы исследования

Объектами исследования были наполненные техническим углеродом эластомеры [10]. Исследованы теплофизические характеристики материалов с разными марками технического углерода. Различия свойств используемого в исследованиях технического углерода обуславливают различие и в размерах теплоотдающей и тепловоспринимающей поверхностей. Теплоотдающая поверхность зависит от свойств первичных и вторичных структур [1, 23]. В этой связи в исследованиях использованы три марки технического углерода с отличающимися характеристиками, влияющими на процессы теплообмена и теплопередачи: степенью активности, структурностью, размером частиц [24, 25]:

- П-514 – среднеактивный технический углерод со средним значением дисперсности и средним значением структурности (удельная внешняя поверхность 50–57 м²/г, удельная адсорбционная поверхность 98–102 м²/г, среднеквадратичный диаметр частиц 39,5 нм);

- П-234 – активный технический углерод с высоким значением дисперсности и средним значением структурности (удельная внешняя поверхность 94–102 м²/г, удельная адсорбционная поверхность 104–114 м²/г; среднеквадратичный диаметр частиц 24,6 нм);
- ПЗ66Э – технический углерод с развитой структурностью, высоким значением удельной и полной поверхности (удельная внешняя поверхность 117–119 м², удельная адсорбционная поверхность 240–245 м²/г, среднеквадратичный диаметр частиц 22,5 нм).

В качестве связующей основы применен бутилкаучук БК-2055. Концентрация технического углерода составляла 80 весовых частей на 100 весовых частей материала связующей основы. Экспериментально установлено, что такая концентрация позволяет применять отработанную для резинотехнической промышленности прессовую технологию изготовления. Увеличение концентрации требует разработки специальной технологии для жёстких смесей [1].

Характеристики, определяющие внутреннюю реакцию материала на тепловое воздействие: теплопроводность, удельную теплоемкость, температуропроводность, исследованы с помощью анализатора DLF-1200 [26]. В нем использован метод лазерной вспышки – на лицевую поверхность образца воздействуют коротким импульсом. Для оптимизации поглощения импульса образцы покрывались тонким слоем графита. Задавались параметры образца: масса, диаметр, высота, плотность.

Результаты исследования

Некоторые из полученных результатов представлены на рис. 1–3.

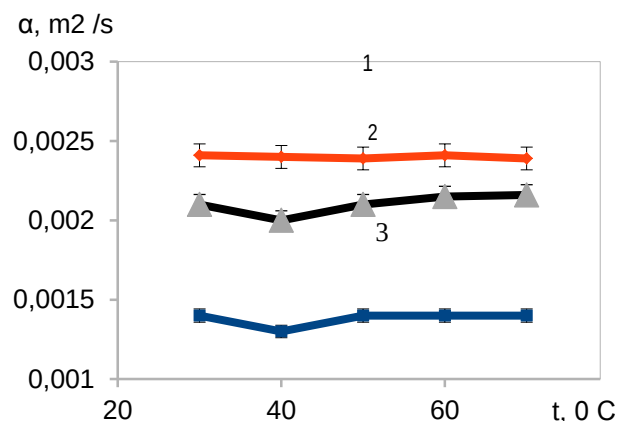


Рис. 1. Зависимость коэффициента температуропроводности от температуры: технический углерод марки: 1 – П-366Э; 2 – П-234; 3 – П-514

Fig. 1. Dependence of the thermal diffusivity coefficient on temperature: carbon black grade: 1 – P-366Э; 2 – P-234; 3 – P-514

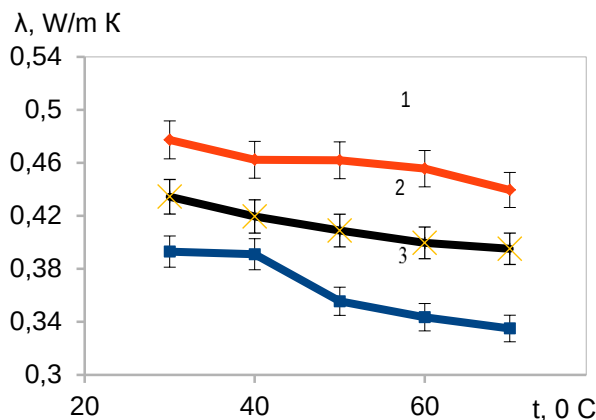


Рис. 2. Зависимость коэффициента теплопроводности от температуры технического углерода разных марок (обозначения марок углерода те же, что на рис. 1)

Fig. 2. Dependence of the thermal conductivity coefficient on the temperature of carbon black of different grades (designations of carbon grades are the same as in Fig. 1)

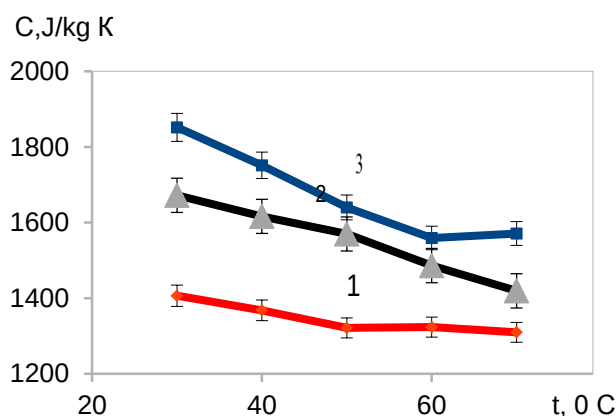


Рис. 3. Зависимость удельной теплоемкости от температуры технического углерода разных марок (обозначения марок углерода те же, что на рис. 1, 2)

Fig. 3. Dependence of specific heat capacity on temperature of carbon black of different grades (designations of carbon grades are the same as in Fig. 1, 2).

Представленные на рис. 1–3 материалы позволяют сделать вывод о том, что вид технического углерода по-разному влияет на различные теплофизические характеристики композиционного материала. В частности, наблюдались следующие эффекты:

- температура в исследованном диапазоне не оказывает существенного влияния на температуропроводность;
- теплопроводность незначительно уменьшается при повышении температуры;
- при замене в материале технического углерода П-514 на П-234 и на П-366Э температуропро-

водность и теплопроводность уменьшаются, а теплоемкость увеличивается.

Воздействие тепловых процессов на структуру наполненных полимеров исследовано в ряде работ [1, 21–23]. В полимере под действием тепловой энергии происходят процессы, связанные с поглощением тепла (процессы стеклования, плавления) и с выделением тепловой энергии, сопровождающие химические реакции (деструкция макромолекул, их окисление) и др. [1, 2, 22]. При частичной деструкции молекул могут образовываться заряженные частицы или свободные радикалы, взаимодействующие как с частицами наполнителя, так и с частицами полимера. Согласно результатам исследований, взаимодействие «эластомер – технический углерод» влияет на межмолекулярное взаимодействие, соответственно через плотность упаковки – на вид электропроводящей сетки [1, 2, 27, 28]. На поверхности частиц электропроводящего компонента могут индуцироваться заряды. Это также может влиять на конфигурацию электропроводящей сетки и, соответственно, на тепловые процессы в материале. Электропроводящая система может как разрушаться, так и структурироваться. Электропроводящие частицы при тепловом воздействии могут перераспределиться как более равномерно, так и менее равномерно. Можно полагать, что изменения теплофизических характеристик композиционного материала обусловлены не только аддитивным вкладом электропроводящего компонента в формирование свойств, но и изменениями структуры эластомера, в том числе формированием структур из частиц технического углерода.

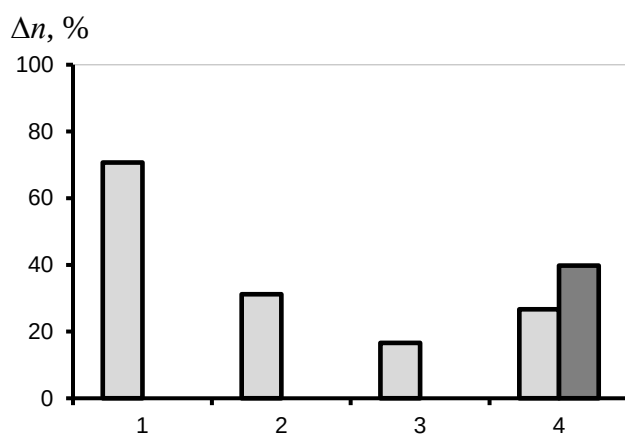


Рис. 4. Диапазон изменения показателей: 1 – температуропроводность; 2 – теплопроводность; 3 – теплоемкость; 4 – коэффициент нелинейности (слева), энтропия текстурного признака (справа)

Fig. 4. Range of changes in indicators: 1 – thermal diffusivity; 2 – thermal conductivity; 3 – heat capacity; 4 – nonlinearity coefficient (left), entropy of the texture feature (right)

На рис. 4 представлен диапазон изменения характеристик при использовании технического углерода рассматриваемых марок. Изменение каждого показателя оценивалось как отношение разности величин данного показателя для композита с наполнителями П-514 и П-366Э к величине показателя для композита с наполнителем П-514. Теплофизические характеристики сравнивались при температуре 70 °С.

Выявлено, что в исследованном диапазоне температур для рассматриваемых марок технического углерода теплопроводность возрастает меньше, чем снижается теплоемкость. Из изучаемых характеристик больше всего изменяется температуропроводность. На основании анализа литературных данных по теплофизическим процессам в наполненных полимерах можно предположить, что степень изменения характеристик может быть связана со свойствами технического углерода и его вкладом в формирование структуры композиционного материала. По этой причине проанализированы свойства примененных марок технического углерода и оценены показатели, связанные с характером распределения его в эластомере.

Теплофизические характеристики сопоставлены со степенью агломерирования, размером первичных частиц и размером агломерата технического углерода. В цепочке П-514, П-234, П-366Э размер частиц уменьшается, структурность и размер агломератов увеличивается [24, 25]. Установлено, что возрастание степени агломерирования увеличивает температуропроводность и теплопроводность, но снижает теплоемкость.

Для оценки полученных результатов проанализировано изменение характера электропроводящей сетки, которая формируется под влиянием частиц электропроводящего компонента [1]. Рассчитана энтропия текстурного признака изображения структуры, которая, согласно исследованиям [27, 28], отражает разветвленность электропроводящей сетки. Изображения структуры материала с просвечивающего микроскопа обрабатывались по методике, описанной в [27]. На изображениях в градациях серого выделялись границы между проводящим компонентом и эластомером с использованием текстурного признака B_A , который отражает автокорреляцию гистограммы совместного распределения яркости второго порядка (характеризует взаимосвязь двух соседних точек изображения). Динамика энтропии текстурного признака вычислялась по показателям, полученным в [27] для выбранных объектов исследования (рис. 4). Сравнение данных, показанных на рис. 1–3, с данными на рис. 4. позволило установить, что с формированием более разветвленной проводящей сетки теплопроводность возрастает.

Характер взаимодействия электропроводящего компонента с эластомером оценен по коэффициенту нелинейности, который рассчитывался по вольтамперной характеристике материалов с использованием методики, описанной в [1]. Процент изменения коэффициента нелинейности (отношение разности коэффициентов нелинейности материалов с техническим углеродом П 514 и П 366Э к значению при П 514) представлен на рис. 4. Согласно проведенным в [11] исследованиям, он связан с количеством полимерных прослоек между частицами технического углерода. Увеличение количества прослоек связующего материала при использовании технического углерода П-514 существенно снижает теплопроводность материала, на что указывает уменьшение коэффициента нелинейности. Это соответствует теоретическим представлениям, описанным в [21].

Заключение

Выявленные зависимости теплофизических свойств наполненных техническим углеродом эластомеров от вида технического углерода позволяют решать задачи конструирования материалов, в наибольшей степени отвечающих требованиям заданной области применения. Материал, в состав которого входит технический углерод П-514, про-

являет теплоизоляционные свойства. Теплопроводность повышается незначительно, что важно для сохранения теплозащитных свойств. Поэтому в условиях регулирования электропроводности при решении задач обеспечения теплоизоляции в качестве электропроводящего компонента целесообразно применять материалы с П-514.

Эксперименты показали, что применение в материале технического углерода с большей дисперсностью и структурностью позволяет повысить теплопроводность и температуропроводность материала. Применение высокодисперсного технического углерода П-366Э позволяет увеличить температуропроводность и теплопроводность композиционного материала при одновременном уменьшении теплоемкости. Высокая теплопроводность обеспечивает быструю передачу тепла, его хорошее рассеивание. Поэтому материал с П-366Э в качестве электропроводящего компонента целесообразно применять для обеспечения высокой термической стабильности электротехнических устройств. Увеличение коэффициента температуропроводности позволяет уменьшить время выравнивания температуры. Поэтому материал с П-366Э целесообразно применять в нестационарном тепловом поле.

СПИСОК ЛИТЕРАТУРЫ

1. Гуль В.Е., Шенфиль Л.З. Электропроводящие полимерные композиты. – М.: Химия, 1984. – 226 с.
2. Multifunctional shape memory composites for joule heating, self-healing, and highly efficient microwave absorption / Y. Liu, X. Wei, X. He, J. Yao, R. Tan, P. Chen, B. Yao, J. Zhou, Z. Yao // *Advanced Functional Materials*. – 2023. – Vol. 33. – № 5. – P. 2211352.
3. Setnescu R.A., Lungulescu E.M., Marinescu V.E. Polymer composites with self-regulating temperature behavior: properties and characterization // *Materials*. – 2022. – Vol. 16. – № 1. – P. 157–159.
4. Polymer composites with hierarchical architecture and dielectric particles for efficient daytime subambient radiative cooling / Q. Yue, L. Zhang, C.Y. He, B.H. Liu, W.M. Wang // *Journal of Materials Chemistry A*. – 2023. – Vol. 11. – № 6. – P. 3126–3135.
5. Preparation and application practice of temperature self-regulating flexible polymer electric heaters / I. Ali, A. Shchegolkov, N. Zemtsova, V. Bogoslovskiy, G. Shigabaeva, E. Galunin // *Polymer Engineering & Science*. – 2022. – Vol. 62. – № 3. – P. 730–742.
6. Lightweight, few-layer graphene composites with improved electro-thermal properties as efficient heating devices for de-icing applications / H. Ba, L. Truong-Phuoc, T. Romero, C. Sutter // *Carbon*. – 2021. – Vol. 182. – P. 655–668.
7. Jain J., Sinha S. Pineapple leaf fiber polymer composites as a promising tool for sustainable, eco-friendly composite material // *Journal of Natural Fibers*. – 2022. – Vol. 19. – № 15. – P. 10031–10052.
8. Hou Y.H., Zhang M.Q., Rong M.Z. Performance stabilization of conductive polymer composites // *Journal of applied polymer science*. – 2003. – Vol. 89. – № 9. – С. 2438–2445.
9. Эластомеры и полимерные композиции для нефтепромыслового оборудования. Проблемы и возможности / И.С. Пятов, С.В. Тихонова, А.И. Салимон, Л.В. Воробьева, В.В. Лунев, Л.Э. Фомичева. URL: <https://ream-rti.ru/upload/iblock/ae0/ae0e77ad7e2cdbe88098556f439ac345.pdf> (дата обращения 25.03.2024).
10. 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.
11. Минакова Н.Н., Сквирская И.И., Ушаков В.Я. Исследование природы неустойчивости основных характеристик крупногабаритных полимерных резисторов // *Электричество*. – 2001. – № 3. – С. 38–42.
12. Detailed understanding of the carbon black–polymer interface in filled rubber composites / L.A. Wilke, C.G. Robertson, D.A. Karsten, N.J. Hardman // *Carbon*. – 2023. – Vol. 201. – С. 520–528.
13. Gwon S., Kim H., Shin M. Self-heating characteristics of electrically conductive cement composites with carbon black and carbon fiber // *Cement and Concrete Composites*. – 2023. – Vol. 137. – P. 104942.
14. 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. – № 9. – P. S288–S295.
15. 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. – № 8. – P. 212–214.
16. Щегольков А.В., Щегольков А.В. Антиобледенительные системы на основе эластомеров, модифицированных углеродными наноструктурами, с эффектом саморегулирования температуры // *Природные ресурсы Арктики и Субарктики*. – 2022. – Vol. 27. – № 1. – С. 141–151.

17. Jain J., Sinha S. Pineapple leaf fiber polymer composites as a promising tool for sustainable, eco-friendly composite material // *Journal of Natural Fibers*. – 2022. – Vol. 19. – № 15. – P. 10031–10052.
18. The role of fillers to enhance the mechanical, thermal, and wear characteristics of polymer composite materials: a review / R. Yadav, M. Singh, D. Shekhawat, S. Lee // *Composites Part A: Applied Science and Manufacturing*. – 2023. – Vol. 175. – P. 107775.
19. He X., Wang Y. Recent advances in the rational design of thermal conductive polymer composites // *Industrial & Engineering Chemistry Research*. – 2021. – Vol. 60. – № 3. – P. 1137–1154.
20. Минакова Н.Н., Ушаков В.Я. Теплофизические характеристики полимерных композиционных материалов с углеродными компонентами для электротехнических устройств // *Известия томского политехнического университета. Инжиниринг георесурсов*. – 2023. – Т. 334. – № 6. – С. 134–139.
21. Липатов Ю.С. Физико-химические основы наполнения полимеров. – М.: Химия, 1991. – 260 с.
22. Бартенев Г.М., Френкель С.Я. Физика полимеров. – Л.: Химия, 1990. – 432 с.
23. Годовский Ю.К. Теплофизика полимеров. – М.: Химия, 1982. – 280 с.
24. ГОСТ 7885-86. Углерод технический для производства резины. URL: <https://files.stroyinf.ru/Data2/1/4294822/4294822274.pdf> (дата обращения 15.02.2024).
25. Раздьяконова Г.И. Получение и свойства дисперсного углерода. – Омск: ОмГТУ, 2014. – С. 154–156.
26. Инструкция по работе с прибором DLF-1200 URL: <https://www.directindustry.com.ru/prod/ta-instruments/product-38477-1796308.html> (дата обращения 25.02.2024).
27. Бортников А.Ю., Минакова Н.Н. Текстурно-фрактальный анализ микроскопических срезов образцов композиционных материалов, наполненных техническим углеродом // *Известия Томского политехнического университета*. – 2006. – Т. 309. – № 6. – С. 64–67.
28. Минакова Н.Н., Карпов С.А., Ушаков В.Я. Текстульный метод исследования резистивных свойств дисперсно-наполненных эластомеров // *Известия вузов. Физика*. – 2000. – Т. 43. – № 10. – С. 16–23.

Информация об авторах

Наталья Николаевна Минакова, доктор физико-математических наук, профессор, кафедра информационной безопасности Алтайского государственного университета, Россия, 656049, г. Барнаул, пр. Ленина, 61. minakova@asu.ru; <https://orcid.org/0000-0001-7665-8069>

Василий Яковлевич Ушаков, доктор технических наук, профессор Инженерной школы энергетики Национального исследовательского Томского политехнического университета, Россия, 634050, г. Томск, пр. Ленина, 30. vyush@tpu.ru; <https://orcid.org/0000-0003-2931-2086>

Поступила в редакцию: 08.04.2024

Поступила после рецензирования: 04.07.2024

Принята к публикации: 09.09.2024

REFERENCES

1. Gul V.E., Shenfil L.Z. *Electrically conductive polymer composites*. Moscow, Khimiya Publ., 1984. 226 p. (In Russ.)
2. Liu Y., Wei X., He X., Yao J., Tan R., Chen P., Yao B., Zhou J., Yao Z. Multifunctional shape memory composites for joule heating, self-healing, and highly efficient microwave absorption. *Advanced Functional Materials*, 2023, vol. 33, no. 5, pp. 2211352.
3. Setnescu R.A., Lungulescu E.M., Marinescu V.E. Polymer composites with self-regulating temperature behavior: properties and characterization. *Materials*, 2022, vol. 16, no. 1, pp. 157–159.
4. Yue Q., Zhang L., He C.Y., Liu B.H., Wang W.M. Polymer composites with hierarchical architecture and dielectric particles for efficient daytime subambient radiative cooling. *Journal of Materials Chemistry A*, 2023, vol. 11, no. 6, pp. 3126–3135.
5. Ali I., Shchegolkov A., Zemtsova N., Bogoslovskiy V., Shigabaeva G., Galunin E. Preparation and application practice of temperature self-regulating flexible polymer electric heaters. *Polymer Engineering & Science*, 2022, vol. 62, no. 3, pp. 730–742.
6. Ba H., Truong-Phuoc L., Romero T., Sutter C. Lightweight, few-layer graphene composites with improved electro-thermal properties as efficient heating devices for de-icing applications. *Carbon*, 2021, vol. 182, pp. 655–668.
7. Jain J., Sinha S. Pineapple leaf fiber polymer composites as a promising tool for sustainable, eco-friendly composite material. *Journal of Natural Fibers*, 2022, vol. 19, no. 15, pp. 10031–10052.
8. Hou Y.H., Zhang M.Q., Rong M.Z. Performance stabilization of conductive polymer composites. *Journal of applied polymer science*, 2003, vol. 89, no. 9, pp. 2438–2445.
9. Pyatov I.S., Tikhonova S.V., Salimov A.I., Vorobyeva L.V., Lunev V.V., Fomocheva L.E. *Elastomers and polymer compositions for oilfield equipment. Problems and opportunities*. (In Russ.) Available at: <https://ream-rti.ru/upload/iblock/ae0/ae0e77ad7e2cdbe88098556f439ac345.pdf> (accessed 25 March 2024).
10. 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 Russ.) DOI: 10.18799/24131830/2024/5/4531
11. Minakova N.N., Skvirskaya I.I., Ushakov V.Ya. Investigation of the instability nature of main characteristics of large size polymer resistors. *Elektrichestvo*, 2001, no.3, pp. 38–42. (In Russ.)
12. Karsten D.A., Hardman N.J., Wilke L.A., Robertson C.G. Detailed understanding of the carbon black–polymer interface in filled rubber composites. *Carbon*, 2023, vol. 201, pp. 520–528.
13. Gwon S., Kim H., Shin M. Self-heating characteristics of electrically conductive cement composites with carbon black and carbon fiber. *Cement and Concrete Composites*, 2023, vol. 137, pp. 104942.

14. 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. S288–S295.
15. 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, p. 212–214.
16. Shchegolkov A.V., Shchegolkov A.V. Anti-icing systems based on elastomers modified with carbon nanostructures with the effect of self-regulation of temperature. *Prirodnye Resursy Arktiki i Subarkтики*, 2022, vol. 27, no. 1, pp. 141–151. (In Russ.)
17. Jain J., Sinha S. Pineapple leaf fiber polymer composites as a promising tool for sustainable, eco-friendly composite material. *Journal of Natural Fibers*, 2022, vol. 19, no. 15, pp. 10031–10052.
18. Yadav R., Singh M., Shekhawat D., Lee S. The role of fillers to enhance the mechanical, thermal, and wear characteristics of polymer composite materials: a review. *Composites Part A: Applied Science and Manufacturing*, 2023, vol. 175, pp. 107775.
19. 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.
20. Minakova N.N., Ushakov V.Ya. Thermophysical characteristics of polymer composite materials with carbon components for electrical devices. *Bulletin of the Tomsk Polytechnic University. Geo Assets Engineering*, 2023, vol. 334, no. 6, pp. 134–139. (In Russ.) DOI: 10.18799/24131830/2024/5/4531
21. Lipatov Yu.S. *Physico-chemical basis of polymer filling*. Moscow, Khimiya Publ., 1991. 260 p. (In Russ.)
22. Bartenev G.M., Frenkel S.Ya. *Physics of polymers*. Leningrad, Khimiya Publ., 1990. 432 p. (In Russ.)
23. Godovsky Yu.K. *Thermophysics of polymers*. Moscow, Khimia Publ., 1982. 280 p. (In Russ.)
24. SS 7885-86. *Technical carbon for rubber production*. (In Russ.) Available at: <https://files.stroyinf.ru/Data2/1/4294822/4294822274.pdf> (accessed 25 March 2024).
25. Razdyakonova G.I. *Preparation and properties of dispersed carbon*. Omsk, Omsk State Technical University Publ. House, 2014. 236 p. (In Russ.)
26. *Instructions for using the DLF-1200*. (In Russ.) Available at: <https://www.directindustry.com.ru/prod/ta-instruments/product-38477-1796308.html> (accessed 27 March 2024).
27. Bortnikov A.Yu., Minakova N.N. Texture-fractal analysis of microscopic sections of samples of composite materials filled with carbon black. *Bulletin of the Tomsk Polytechnic University*, 2006. vol. 309, no. 6, pp. 64–67. (In Russ.)
28. Minakova N.N., Karpov S.A., Ushakov V.Ya. Texture method of studying the resistance properties of disperse-filled elastomers. *Zhurnal Tekhnicheskoy Fiziki*, 2000, no. 43 (10), pp. 821–828. (In Russ.)

Information about authors

Natalya N. Minakova, Dr. Sc., Professor, Altai State University, 61, Lenin avenue, Barnaul, 656049, Russian Federation. minakova@asu.ru; <https://orcid.org/0000-0001-7665-8069>

Vasily Ya. Ushakov, Dr. Sc., Professor, National Research Tomsk Polytechnic University, 30, Lenin avenue, Tomsk, 634050, Russia. vyush@tpu.ru; <https://orcid.org/0000-0003-2931-2086>

Received: 08.04.2024

Revised: 04.07.2024

Accepted: 09.09.2024

УДК 62-1/-9

DOI: 10.18799/24131830/2024/9/3584

Шифр специальности ВАК: 2.5.2

Разработка виброзащитной системы с квазиулево́й жесткостью и регулируемыми параметрами

К.А. Кувшинов^{1✉}, А.Н. Гаврилин¹, Б.Б. Мойзес¹, А.И. Нижегородов², М.А. Кузнецов¹

¹ Национальный исследовательский Томский политехнический университет, Россия, г. Томск

² Национальный исследовательский Иркутский государственный технический университет, Россия, г. Иркутск

✉ kuvshinov@tpu.ru

Аннотация. Актуальность. При выполнении рабочих процессов технологическое оборудование излучает вибрацию, которая является следствием повышенных динамических нагрузок в конструктивных элементах и сопряжениях систем в целом и их элементов. При этом может существенно ускоряться развитие усталостных разрушений. Поэтому решение задач, связанных со снижением уровня вибрации, всегда актуально. Одно из направлений исследований направлено на разработку и применение систем вибрационной защиты. Различают пассивные вибрационные защитные системы и активные, с возможностью управления параметрами вибрации. Каждый из видов защитных систем имеет линейный закон изменения жесткости, что не позволяет эффективно демпфировать низкочастотные колебания. Таким образом, информационный обзор демонстрирует перспективность работ по созданию систем вибрационной защиты, постоянно улучшая их параметры в аспекте: минимизации габаритных размеров и количества деталей; повышения надежности, особенно в резонансном режиме; обеспечения возможности работы на режимах с малой жесткостью. Последний фактор обуславливает хорошее гашение вибрации, излучаемой источником. **Цель:** исследование возможности разработки виброзащитной системы с квазиулево́й жесткостью с возможностью эффективного демпфирования низкочастотных колебаний. **Методы:** информационно-аналитический обзор в сфере научного исследования, поиск конструктивных решений, проведение предварительных проектных расчетов и 3D-моделирование, описание разрабатываемого устройства и его принципов работы. **Результаты.** Приведены результаты разработки системы защиты от вибрации, имеющей квазиулево́ую жесткость. Приведен фрагмент информационного обзора существующих виброзащитных систем. Сделан вывод о недостатках, характерных для всех систем: относительно больших размерах, большом числе элементов, недостаточном рабочем частотном диапазоне. Авторами предложено конструктивное решение для создания системы гашения колебаний с нелинейным законом изменения жесткости, которое позволит устранить приведенные недостатки и обеспечить возможность эффективного гашения низкочастотных колебаний. Создана методика расчета конструктивных параметров системы виброгашения. Приведен пример расчета. Данная система отличается от существующих виброзащитных устройств малой жесткостью и небольшими габаритами, широким рабочим частотным диапазоном гашения колебаний. Обоснована эффективность работы системы с нелинейной квазиулево́й жесткостью.

Ключевые слова: вибрация, системы защиты от вибрации, квазиулево́ая жесткость, разработка, принципиальная схема работы, 3D-модель

Для цитирования: Разработка виброзащитной системы с квазиулево́й жесткостью и регулируемыми параметрами / К.А. Кувшинов, А.Н. Гаврилин, Б.Б. Мойзес, А.И. Нижегородов, М.А. Кузнецов // Известия Томского политехнического университета. Инжиниринг георесурсов. – 2024. – Т. 335. – № 9. – С. 115–127. DOI: 10.18799/24131830/2024/9/3584

UDC 62-1/-9

DOI: 10.18799/24131830/2024/9/3584

Development of vibration protection system with quasi-zero stiffness and adjustable parameters

K.A. Kuvshinov^{1✉}, A.N. Gavrilin¹, B.B. Moyzes¹, A.I. Nizhegorodov², M.A. Kuznetsov¹

¹ National Research Tomsk Polytechnic University, Tomsk, Russian Federation

² Irkutsk National Research Technical University, Irkutsk, Russian Federation

✉ kuvshinov@tpu.ru

Abstract. Relevance. While performing the operation processes, the technological equipment emits vibration. Vibration is a consequence of increased dynamic loads in structural elements and interfaces between systems and their elements. The development of fatigue damage can significantly accelerate. Therefore, the solution of the problems related to reducing vibration levels is always relevant. Each type of protective system has a linear law of changing the stiffness. This does not allow the effective damping of low-frequency vibrations. Thus, the information review demonstrates the future of the research according to the creation of the vibration protection systems, constantly improving their parameters in the following aspects: minimizing overall dimensions and number of parts; increasing reliability, especially in resonant mode; providing the ability to operate in modes with low stiffness. The last factor determines the good damping of vibration emitted by the source. **Aim.** To study the possibility of the vibration protection system development with quasi-zero stiffness with the ability to effectively dampen low-frequency vibrations. **Methods.** Information and analytical review in the field of the research, search for the constructive solutions, preliminary design calculations and 3D modeling, description of the device being developed and its operating principles. **Results.** The research presents the results of development of the vibration protection system with quasi-zero stiffness and a fragment of an information review of existing vibration protection systems. The authors indicated the main shortcomings specific to all vibration protection systems: relatively large sizes, large number of elements, insufficient operating frequency range. The authors proposed a constructive solution for creating a vibration damping system with a nonlinear law of change in stiffness. This solution allows eliminating the above shortcomings and providing the possibility of effective damping of low-frequency vibrations. The authors created the method for calculating the constructive parameters of a vibration damping system. An example of calculation is given in the paper. This system differs from existing vibration protection devices in its low stiffness and small dimensions, and a wide operating frequency range of vibration damping. The efficiency of the system operating with nonlinear and quasi-zero stiffness is proved.

Keywords: vibration, vibration protection systems, quasi-zero stiffness, development, operating principle, 3D model

For citation: Kuvshinov K.A., Gavrilin A.N., Moyzes B.B., Nizhegorodov A.I., Kuznetsov M.A. Development of vibration protection system with quasi-zero stiffness and adjustable parameters. *Bulletin of the Tomsk Polytechnic University. Geo Assets Engineering*, 2024, vol. 335, no. 9, pp. 115–127. DOI: 10.18799/24131830/2024/9/3584

Введение

Работа технических систем сопровождается вибрационными процессами. Данные процессы приводят к повышенным динамическим нагрузкам, действующим на конструктивные элементы систем, значительно снижающим несущую способность конструкций и приводящим к появлению усталостных разрушений. В связи с этим решение задачи снижения уровня вибрации всегда актуально. Одно из направлений решения данных проблем – разработка и применение систем вибрационной защиты.

По возможности управления параметрами вибрации различают активные вибрационные защитные системы и пассивные. Управление вибрационными параметрами возможно только в активных и

пассивных системах в соответствии с ГОСТ 26568-85 «Вибрация. Методы и средства защиты. Классификация».

Активные виброзащитные системы предназначены для обеспечения максимальной неподвижности объекта виброзащиты в фазе, противоположной фазе вибрирующего основания. Применение систем данного типа ограничено их конструктивной сложностью, обуславливающей пониженную надежность при эксплуатации.

Пассивные системы виброзащиты основаны на применении пассивных элементов: упругих, диссипативных, инерционных [1–3].

Рассмотрим примеры пассивных виброзащитных систем: пружинный вибрационный изолятор с

демпфером [1], динамический вибраторный гаситель [2], вибраторный изолятор для технологического оборудования [3–5].

Пружинный виброизолятор [1] относится к подвесным виброизолирующим системам, при создании которых требование к габаритным размерам является второстепенным. Поэтому он имеет относительно большие габариты, а для опорных систем защиты от вибрации требования по минимизации размеров является важным.

Данный динамический виброгаситель [2] имеет достоинства – повышение точности регулирования частоты собственных колебаний по сравнению с другими устройствами. При этом можно отметить перспективность расширения рабочих частот, а также добавление возможности настройки при непрерывном вращении вала устройства.

Недостатком виброизолятора для технологического оборудования [3, 4] является то, что на резонансных частотах гашения вибрации не происходит из-за отсутствия демпфирования колебаний.

Применение виброизолятора [3] существенно ограничено его неспособностью гасить колебания в технологических системах при их работе в резонансных режимах.

Общим недостатком для вышеперечисленных виброзащитных систем является линейный закон изменения жесткости, что не позволяет эффективно демпфировать низкочастотные колебания.

Фрагменты приведенного информационного обзора демонстрируют перспективность дальнейшей работы по созданию систем вибрационной защиты. При проектировании данных систем необходимо стремиться к минимизации габаритных размеров и количества деталей, к постоянному повышению надежности, особенно в резонансном режиме. Желательно предусмотреть возможность работы на режимах с малой жесткостью. В данном случае хорошо гасятся излучаемые источником вибрации.

Системы защиты от вибрации с квазиулевою жесткостью

Системы защиты от вибрации с квазиулевою жесткостью [6–9] являются активными и пассивными [10].

На рис. 1 представлен график с различными участками силовой характеристики систем данного типа – *линейной, нелинейной, квазиулевою*. Все эти участки существуют в момент, когда упругие элементы виброзащитной системы являются деформированными на величины x_1, x_2 .

Рассмотрим участок AB , лежащий на квазиулевою силовой характеристике 3, который характеризуется постоянной величиной вертикальной силы, действующей на систему. При этом коэффици-

ент жесткости на участке AB будет стремиться к нулю. Участок AB – участок, имеющий квазиулевою жесткость, наличие которой обусловлено результатом сложения жесткостей на участках KL и CD , соответственно, линейной и нелинейной.

На графике рис. 1 видно, что участок силовой характеристики AB расположен под углом ϕ к горизонтальной оси ΔX . Значение угла ϕ стремится к нулю, при этом жесткость системы на участке AB также стремится к нулю, поэтому участок AB является силовой характеристикой виброзащитной системы с квазиулевою жесткостью. Данный факт объясняется нахождением системы на данном участке в статическом равновесии, когда жесткость вертикального упругого элемента значительно больше жесткости системы, благодаря чему реализуется возможность гашения вибрации в широком диапазоне частот.

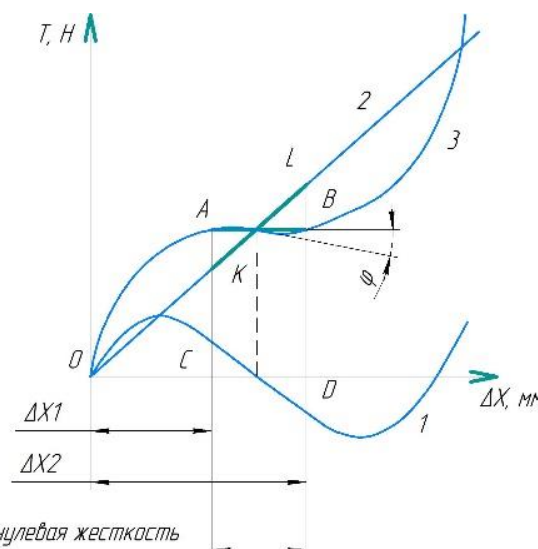


Рис. 1. Жесткостная характеристика виброзащитных систем: 1 – нелинейная; 2 – линейная; 3 – квазиулевою; x_1, x_2 – значения деформации упругих элементов

Fig. 1. Stiffness characteristic of vibration protection systems: 1 – non-linear; 2 – linear; 3 – quasi-zero; x_1, x_2 – deformation values of elastic elements

Принцип работы системы с квазиулевою жесткостью представлен на рис. 2.

При силовом воздействии F на систему ее подвижные элементы меняют свое положение (рис. 2, а). В результате данного силового воздействия (рис. 2, б) подвижные элементы системы занимают симметричное относительно опор положение (рис. 2, в). Нагрузка примет максимальное значение в горизонтальном положении пружин (рис. 2, б).

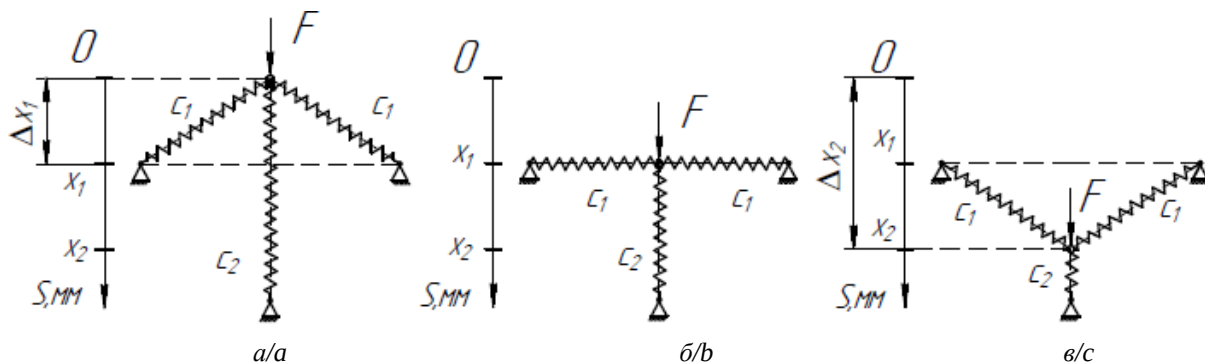


Рис. 2. Схемы положения упругих элементов при силовом воздействии на них: а) начальное; б) промежуточное; в) конечное; c_1 , c_2 – коэффициенты жесткости упругих элементов

Fig. 2. Schemes of the elastic elements position under force: a) initial; b) intermediate; c) final; c_1 , c_2 – stiffness coefficients of elastic elements

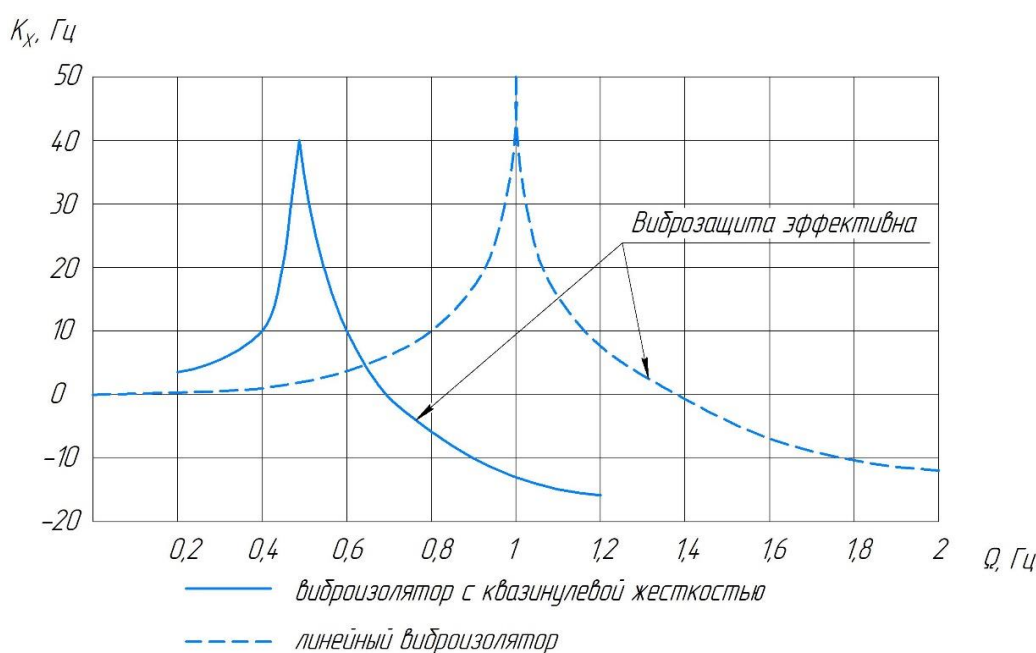


Рис. 3. Значения коэффициента виброизоляции K_x

Fig. 3. Vibration isolation coefficient K_x

Анализ источников информации, посвященных исследованию виброзащитных систем [5–18], в том числе и с квазинулевой жесткостью [5–9], продемонстрировал, что оценку эффективности гашения колебаний можно провести по значению коэффициента виброизоляции K_x .

Для наглядности результатов анализа можно привести зависимости значений коэффициентов виброизоляции K_x [5] от частоты для двух типов систем – с линейной жесткостной характеристикой и с квазинулевой жесткостью (рис. 3).

Защита от вибрации будет эффективна при значении коэффициента $K_x < 0$ dB, таким образом частотный диапазон эффективной работы виброзащитной системы с квазинулевой жесткостью больше, чем у системы с линейной жесткостной харак-

теристикой – сплошная характеристика раньше прерывистой переходит в отрицательную зону.

Виброзащитная система с квазинулевой жесткостью

Творческим коллективом Томского политехнического университета в ходе разработки предложена принципиальная схема виброзащитной системы на основе виброгасителя с квазинулевой жесткостью и гидравлической схемы питания (рис. 4).

Промежуточная масса виброгасителя – 1 установлена на полке – 2, связанной шарнирами – 3 со стаканами – 4. Стаканы – 4 соединены с направляющими – 5 шарнирами – 3. Полка – 2 располагается относительно основания – 5 на рукаве высокого давления – 19.

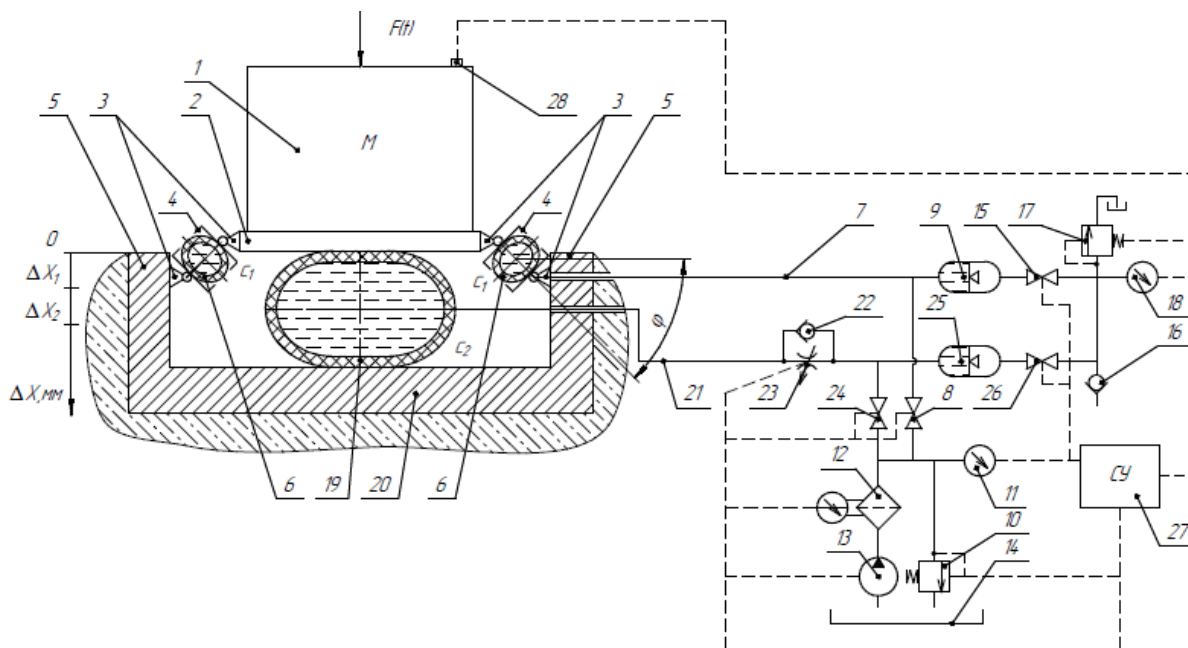


Рис. 4. Принципиальная схема работы виброзащитной системы с квазинулевой жесткостью
Fig. 4. Schematic diagram of the operation of a vibration protection system with quasi-zero stiffness

Рукав высокого давления (шланг) – 19 с жесткостью c_2 , расположенный между основанием – 20 и полкой – 2, связан трубопроводом – 21 с параллельно соединенными обратным клапаном – 22 и регулируемым дросселем – 23 и далее – с вентилем – 24 и с гидропневмоаккумулятором – 25.

Шланги – 6 с жесткостью c_1 размещены внутри стаканов – 4. Они скоммутированы с гидропневмоаккумулятором – 9 через трубопровод – 7 и вентиль – 8.

Через вентиль – 8 идет соединение гидравлических элементов системы с системой формирования среднего давления рабочей жидкости, состоящей из предохранительного клапана – 10, манометра – 11, фильтра – 12, насоса – 13 и бака с рабочей жидкостью – 14.

Гидропневмоаккумуляторы – 9 и 25 подключены к системе создания среднего давления газа через вентили – 15 и 26, обратный – 16 и предохранительный – 17 клапан. Манометром – 18 контролируется давление в системе.

Система управления – 27 с датчиком – 28 предназначена для регулирования параметров виброзащитной системы в зависимости от исходных значений вибрации, с целью снижения уровня вибрации до оптимального уровня.

Система управления – 27 работает следующим образом, с датчика – 28 на систему управления – 27 поступает информация о параметрах вибрации, при этом происходит коррекция параметров (давления, расхода жидкости и др.) управляющих элементов под возникающие параметры вибрации.

Перед началом работы в зависимости от амплитуды и частоты вибрации поочередно настраивают давление в шлангах – 6 и 19, которое может быть различным, посредством открытия/закрытия вентилей – 8 и 24. При этом насос – 13 из бака – 14 через фильтр – 12 подает рабочую жидкость под давлением, величина которого настраивается предохранительным клапаном – 10. Контроль величины давления осуществляют манометром – 11.

В зависимости от значений средних давлений рабочей жидкости в шлангах – 6 и 19 поочередно настраивают давление газа в гидропневмоаккумуляторах – 9 и 25 путем открытия/закрытия вентилей – 15 и 26. Газ поступает в гидропневмоаккумуляторы через обратный клапан – 16. Предохранительный клапан – 17 служит для настройки давления газа на требуемое значение, контролируемое манометром – 18.

Принцип действия виброгасителя с квазинулевой жесткостью (рис. 5) заключается в следующем. Вертикальная нагрузка $F(t)$ воздействует на основание – 20 через промежуточную массу – 1, шланги – 6 и 19.

При силовом воздействии $F(t)$ шланги – 6 и 19 деформируются (рис. 5).

При деформации шланга – 19 рабочая жидкость поступает в гидропневмоаккумулятор – 25, площадь контакта шланга с полкой – 2 и основанием – 20 увеличивается (рис. 6) [16–18]. Шланг будет деформироваться до уравнивания воздействия силы $F(t)$ силой, сформированной давлением в шланге – 19 [19–28].

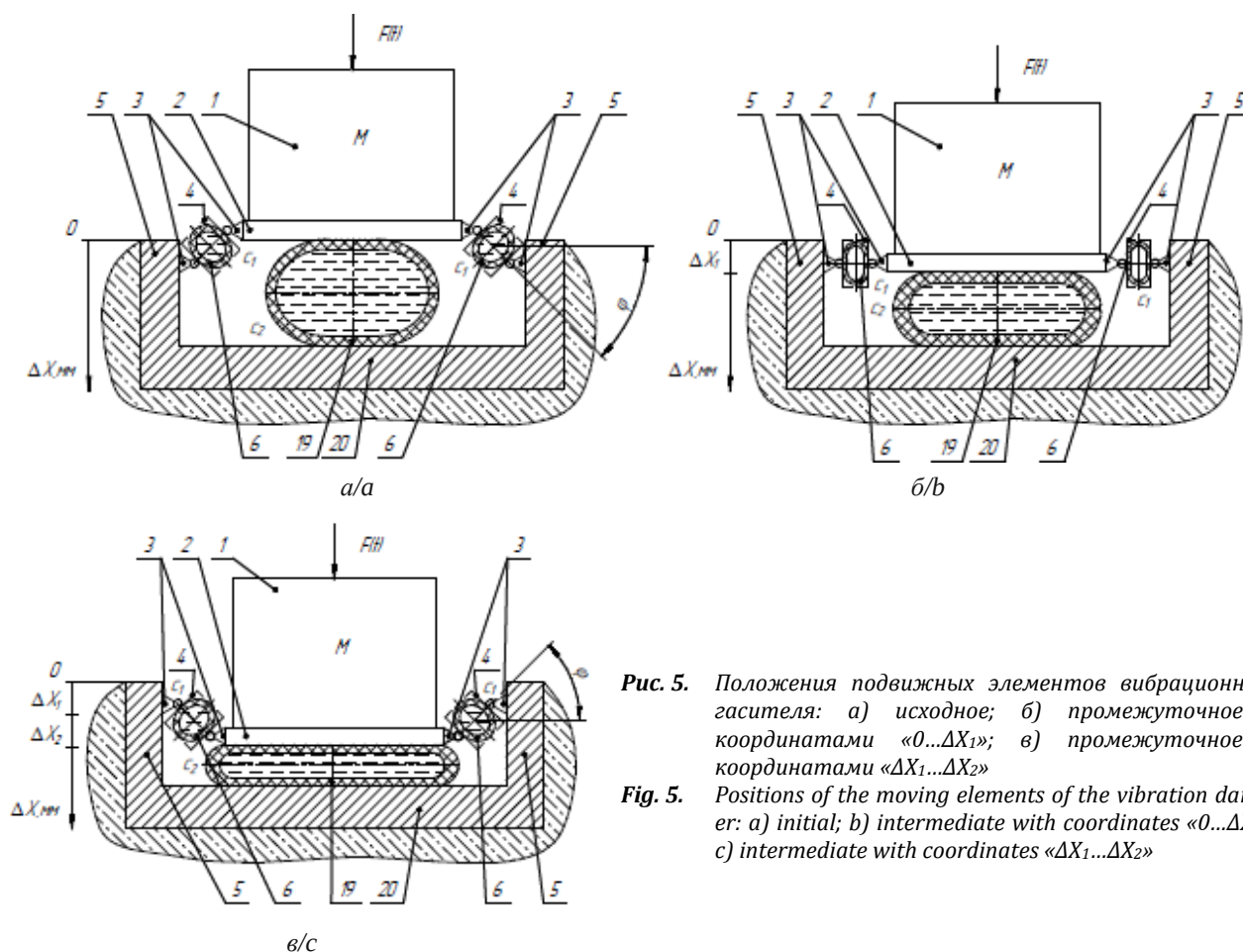


Рис. 5. Положения подвижных элементов вибрационного гасителя: а) исходное; б) промежуточное с координатами «0...ΔX₁»; в) промежуточное с координатами «ΔX₁...ΔX₂»

Fig. 5. Positions of the moving elements of the vibration damper: a) initial; b) intermediate with coordinates «0...ΔX₁»; c) intermediate with coordinates «ΔX₁...ΔX₂»

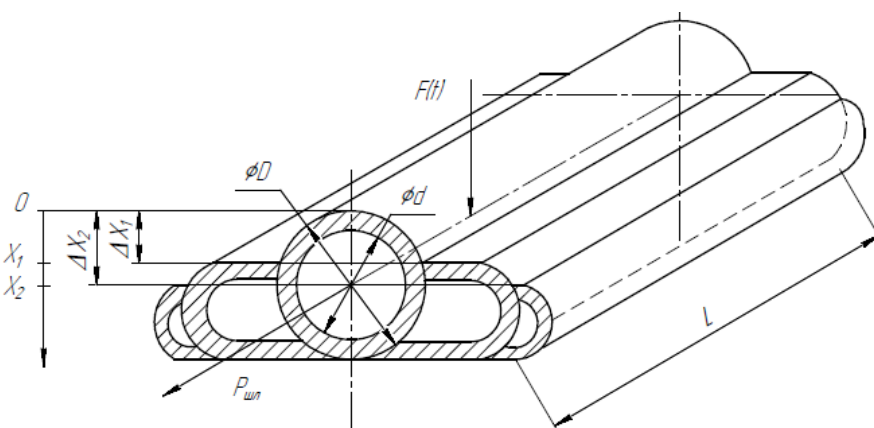


Рис. 6. Упругая деформация шланга
Fig. 6. Hose elastic deformation

Одновременно с этим деформируются и меняют положение шланги – 6 в стаканах – 4, гася колебания. Величина деформации шлангов – 6 увеличивается в координатах «0...ΔX₁» (рис. 5, б). Также изменяется их угловое положение на определенный угол ϕ (рис. 5, а). При этом возникает участок с квазинулевой жесткостью.

Рабочая жидкость из шланга – 6 поступает в гидропневмоаккумулятор – 9 до тех пор, пока давление в шлангах – 6 не станет равным давлению в гидропневмоаккумуляторе – 9.

После снятия нагрузки $F(t)$ рабочая жидкость из гидропневмоаккумуляторов – 9 или – 25 поступает обратно в шланги – 6 и 19.

В процессе упругой деформации шлангов энергия силового воздействия гасится. Процесс демпфирования будет повторяться при повторных силовых воздействиях [29, 30].

Эффективный диапазон гашения частот вибрации определяется двумя факторами:

- величиной давления в гидропневмоаккумуляторах – 9 и 25, формирующей жесткость шлангов – 6 и 19;
- величиной регулирования площади проходного сечения дросселя – 23, задающей темп поглощения энергии устройством.

Система управления – 27 формирует требуемый алгоритм функционирования вентилей – 8, 15, 24, 26, насоса – 13, предохранительных клапанов – 10, 17, дросселя – 23 и акселерометра – 28.

Методика расчета конструктивных параметров виброгасителя

Рассмотрим созданную методику расчета на основе анализа приведенных схем (рис. 5, 6).

Усилие, действующее на полку – 2 виброзащитной системы, определится:

- в начальном положении (рис. 4, а):

$$F = c_2 \cdot \Delta x_2 + 2 \cdot \frac{c_1 \cdot \Delta x_1}{\cos \varphi};$$

- в координатах «0... Δx_1 » (рис. 4, б):

$$F = c_2 \cdot \Delta x_2;$$

- в координатах « Δx_1 ... Δx_2 » (рис. 4, в):

$$F = c_2 \cdot \Delta x_2 - 2 \cdot \frac{c_1 \cdot \Delta x_1}{\cos \varphi},$$

где c_1 , c_2 – жесткость шлангов – 6 и 19; Δx_1 , Δx_2 – величина упругой деформации шлангов – 6 и 19.

Сила тяжести промежуточной массы, которая действует на шланг:

$$F_T = M \cdot g.$$

Жесткость шланга:

$$C_{ш} = C_{шL} + C_{P_0} + C_{\Delta F},$$

где $C_{шL}$ – собственная жесткость шланга на длине L ; C_{P_0} – жесткость, обусловленная предварительным давлением в рукаве P_0 ; $C_{\Delta F}$ – жесткость, обусловленная увеличением площади контакта при силовом воздействии на шланг.

Собственная жесткость шланга на длине L

$$C_{шL} = C_{ш} \cdot L,$$

где $C_{ш}$ – жесткость шланга в сечении; L – длина шлангов.

Жесткость, обусловленная предварительным давлением в рукаве

$$C_{P_0} = \frac{\pi}{2} \cdot P_0 \cdot L.$$

Жесткость, обусловленная увеличением площади контакта

$$C_{\Delta F} = \frac{\pi^2 \cdot \Delta x_2 \cdot L^2}{4 \cdot \beta \cdot W},$$

где W – действительный объем жидкости в шлангах; β – коэффициент сжимаемости жидкости; Δx_2 – величина упругой деформации шланга.

Для определения жесткости $C_{\Delta F}$ рассмотрим силовое воздействие на шланги (статическое или динамическое), в результате которого возникает сила упругости, противодействующая силе тяжести:

$$F_T = F_{упр} = 2 \cdot C \cdot \Delta x,$$

где Δx – изменение координаты деформации рукава высокого давления

$$\Delta x = \frac{M \cdot g}{2 \cdot C_{шL}}.$$

На шланги со стороны груза действует давление [10]:

$$\Delta P = \frac{F_T}{S} = \frac{F_{упр}}{S} = \frac{2 \cdot C_{шL} \cdot \Delta x}{S},$$

где S – площадь контакта полки – 2 со шлангами.

Коэффициент сжимаемости жидкости [10]:

$$\beta = \frac{\Delta W}{\Delta P \cdot W_0},$$

где ΔW – изменение объема жидкости; ΔP – изменение давления.

Объем жидкости в одном шланге в начальном состоянии:

$$W_0 = \frac{\pi \cdot d^2}{4} \cdot L, \quad (1)$$

где d – внутренний диаметр шланга.

Отсюда следует:

$$\Delta W = \beta \cdot \Delta P \cdot W_0.$$

Для расчета величины изменения объема рабочей жидкости в шланге перепишем предыдущую формулу:

$$\Delta W = \beta \cdot \frac{2 \cdot C_{шL} \cdot \Delta x_2}{S} \cdot \frac{\pi \cdot d^2}{4} \cdot L. \quad (2)$$

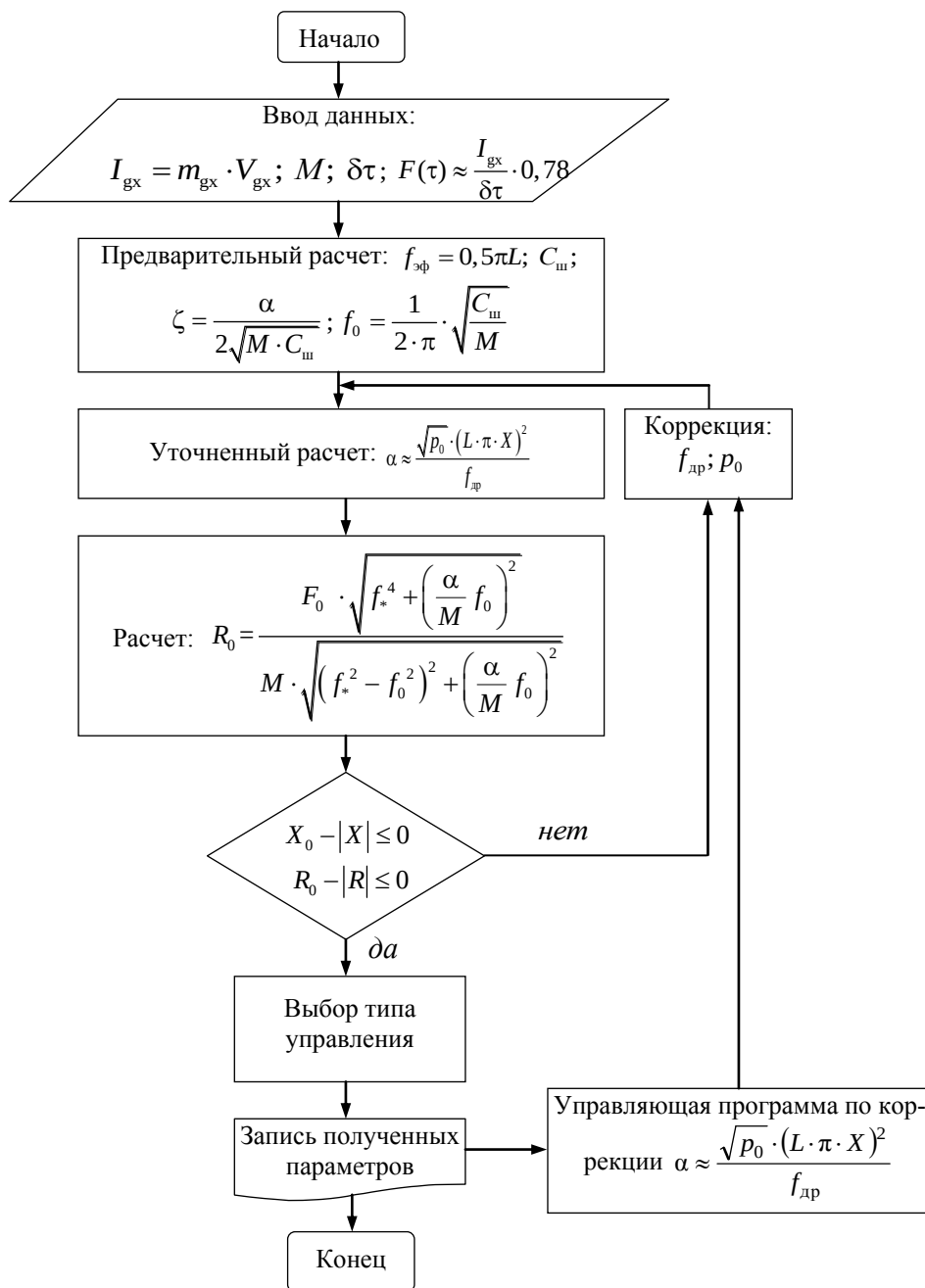


Рис. 7. Блок-схема расчета параметров виброзащиты для гашения вибрационного воздействия в источнике при силовом вибрационном возбуждении

Fig. 7. Block diagram for calculating vibration protection parameters for damping the vibration effect in the source under force vibration excitation

Для определения объема жидкости в шланге необходимо рассмотреть разность между (1) и (2):

$$W = W_0 - \Delta W = \frac{\pi \cdot d^2}{4} \cdot L - \beta \cdot \frac{2 \cdot C_{шL} \cdot \Delta x_2}{S} \cdot \frac{\pi \cdot d^2}{4} \cdot L = \frac{\pi \cdot d^2}{4} \cdot L \left(1 - \beta \cdot \frac{2 \cdot C_{шL} \cdot \Delta x_2}{S} \right).$$

Для данной системы собственная частота колебаний определяется по формуле:

$$f_0 = \frac{1}{2 \cdot \pi} \cdot \sqrt{\frac{C_{ш}}{M}}.$$

Для проектирования эффективной виброзащитной системы необходимо учесть условие:

$$\frac{f}{f_0} \geq \sqrt{2}.$$

Отсюда выразим частоту внешнего воздействия

$$f \geq \sqrt{2} f_0.$$

Сила трения определяется коэффициентом трения и скоростью деформации шланга:

$$F_{\text{тр}} = \alpha \cdot \dot{x},$$

где α – коэффициент трения; $\dot{x}$ – скорость деформации шланга.

Расход рабочей жидкости в шланге

$$Q_{\text{шл}} = f_{\text{шл}} \cdot \dot{x},$$

где $f_{\text{шл}} = \frac{\pi(D^2 - d^2)}{4}$ – площадь поперечного сечения шланга; D – внешний диаметр шланга (рис. 6)

По результатам разработанной методики расчета составлена блок-схема параметров виброзащиты для гашения вибрационного воздействия в источнике при силовом вибрационном возбуждении (рис. 7).

Данный алгоритм позволит в дальнейшем составить программу для автоматического расчета параметров системы.

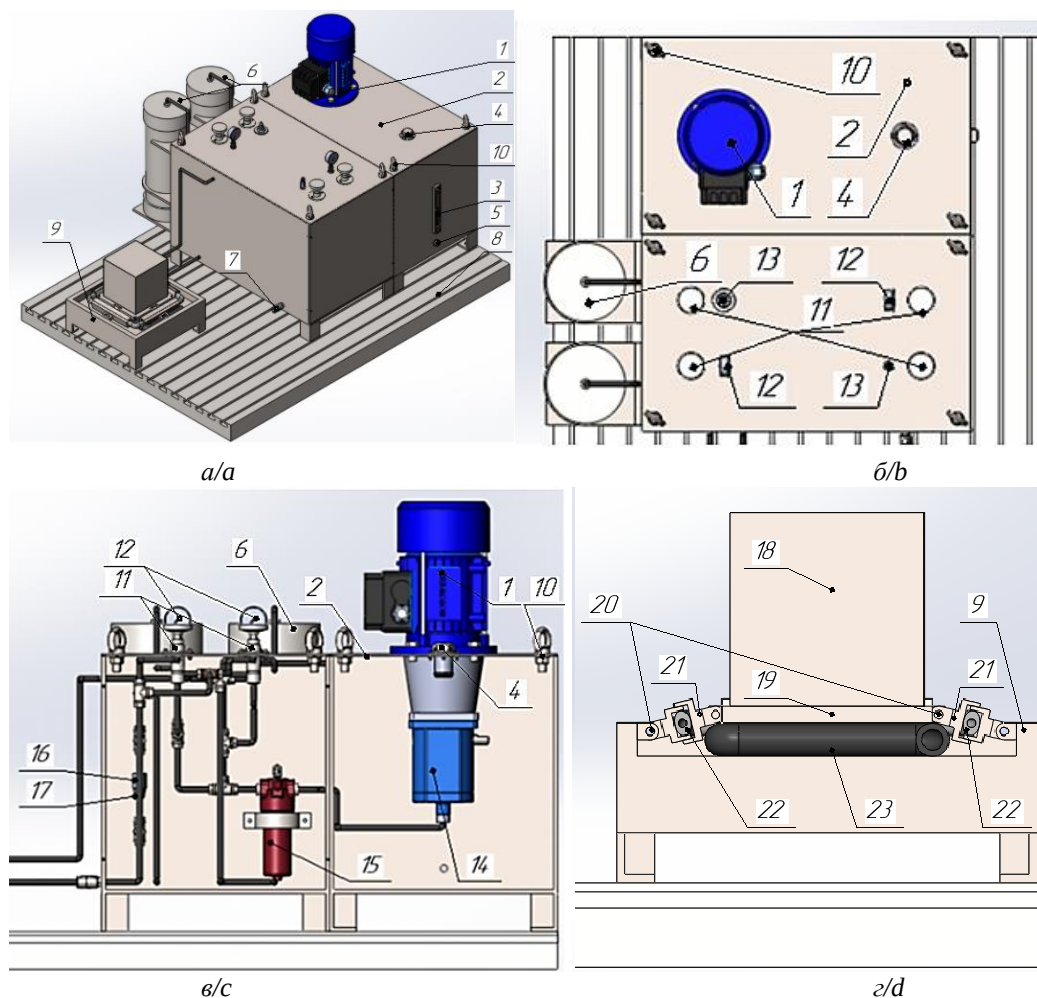


Рис. 8. 3D-модель устройства: а) общий вид виброзащитной системы с квазиулево́й жесткостью; б) вид сверху на систему управления; в) вид изнутри системы управления; г) вид виброгасителя с квазиулево́й жесткостью в разрезе; 1 – электрический двигатель; 2 – корпус гидравлической насосной станции; 3 – маслоуказатель; 4 – пробка масляной заливной горловины; 5 – пробка сливная; 6 – гидропневмоаккумулятор; 7 – обратный клапан; 8 – основание; 9 – корпус виброгасителя; 10 – рым болты; 11 – вентиль; 12 – манометр; 13 – предохранительный клапан; 14 – аксиально-поршневой насос; 15 – фильтр; 16 – дроссель; 17 – обратный клапан; 18 – промежуточная масса; 19 – полка; 20 – шарниры; 21 – стаканы; 22, 23 – шланги

Fig. 8. 3D model of the device: a) general view of the vibration protection system with quasi-zero stiffness; b) top view of the control system; c) view from inside the control system; d) sectional view of a vibration damper with quasi-zero stiffness; 1 – electric motor; 2 – housing of the hydraulic pumping station; 3 – oil indicator; 4 – stopper of an oil jellied mouth; 5 – drain plug; 6 – hydro-pneumatic accumulator; 7 – check valve; 8 – base; 9 – vibration damper body; 10 – eye bolts; 11 – valve; 12 – manometer; 13 – safety valve; 14 – axial piston pump; 15 – filter; 16 – throttle; 17 – check valve; 18 – intermediate mass; 19 – shelf; 20 – hinges; 21 – glasses; 22, 23 – hoses

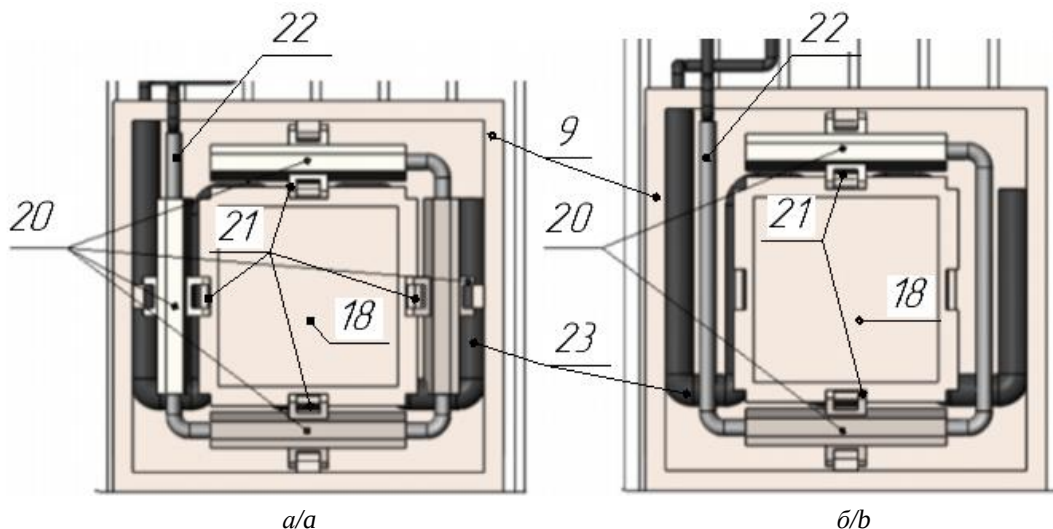


Рис. 9. Варианты исполнения виброгасителя с квазинулевой жесткостью: а) с четырьмя шарнирами; б) с двумя шарнирами

Fig. 9. Versions of the vibration damper with quasi-zero stiffness: а) with four hinges; б) with two hinges

3D-модель виброзащитной системы с квазинулевой жесткостью

После расчетов, позволивших определить основные функциональные параметры разрабатываемой системы, была создана 3D-модель системы (рис. 8, а–в) и виброгасителя (рис. 8, а–в), которая позволили получить предварительное представление об элементом составе устройств, геометрическом исполнении элементов и их размерах, включая габаритные, всей системы, пространственном расположении элементов, процессе сборки и т. д.

Сам принцип действия системы подробно описан выше.

Возможно два варианта исполнения виброгасителя с квазинулевой жесткостью: с четырьмя шарнирами и с двумя шарнирами (рис. 9).

На рис. 9 представлены соединения шарниров – 20 со стаканами – 21. В первом варианте (рис. 9, а) установлено четыре соединения шарниров – 20 со стаканами – 21, во втором – два соединения шарниров – 20 со стаканами – 21 (рис. 9, б). Выбор варианта конструктивного исполнения зависит от требуемых направлений демпфирования вибраций:

- в любом направлении (рис. 9, а);
- вдоль установленных соединений шарниров – 20 со стаканами – 21 (рис. 9, б).

Заключение

В данной исследовательской работе приведен фрагмент информационного обзора существующих виброзащитных систем. По обобщенной информации сделан вывод о недостатках, характерных для всех систем: относительно больших размерах и большом числе элементов, недостаточном рабочем частотном диапазоне и других.

Авторами предложено конструктивное решение, позволяющее создать систему гашения колебаний с нелинейным законом изменения жесткости, который позволяет устранить приведенные выше недостатки.

Определено, что при значениях собственной частоты колебаний до 4 Гц виброгаситель с квазинулевой жесткостью будет эффективно демпфировать вибрацию.

В статье приведены результаты разработки системы защиты от вибрации, имеющей квазинулевую жесткость. Данная система удовлетворяет предъявляемым требованиям, описанным выше, и отличается от существующих виброзащитных устройств малой жесткостью и небольшими габаритами, широким рабочим частотным диапазоном гашения колебаний. Эффективность работы системы обоснована выше (рис. 3) и определяется сравнением величин коэффициентов виброизоляции системы с нелинейной с квазинулевой жесткостью с величинами других систем.

СПИСОК ЛИТЕРАТУРЫ

1. Пружинный виброизолятор с маятниковым подвесом: пат. 2624130, Рос. Федерация, МПК F16 F 3/10; № 2016129224; заявл. 18.07.2016; опубл. 30.06.2017. Бюл. № 03. – 2 с.
2. Динамический гаситель: пат. 2101581, Рос. Федерация, МПК F16 F 15/02, № 2101581, заявл. 17.09.1993; опубл. 10.01.1998. Бюл. № 03. – 6 с.
3. Виброизолятор для технологического оборудования: пат. 2624120, Рос. Федерация, МПК F16 F 3/10, № 2624120, заявл. 14.03.2016; опубл. 10.07.2006. Бюл. № 19. – 6 с.

4. Виброзащитная рукоятка обойного молотка: пат. Рос. Федерация, № 2578299, заявл. 20.09.2014; опубл. 27.03.2016. Бюл. № 9. – 5 с.
5. Сравнительный анализ виброзащитных систем // VibroLAB. 2022. URL: <http://vibro-lab.ru/sravnit-vibroizolyatori> (дата обращения 27.05.2024).
6. Xie B., Sheng M. Ultralow-frequency band gap in a quasi-zero-stiffness multi-resonator periodic hybrid structure // *Wave Motion*. – 2021. – Vol. 107. – 102825.
7. Design and numerical validation of quasi-zero-stiffness metamaterials for very low-frequency band gaps / C. Cai, J. Zhou, L. Wu, K. Wang, D. Xu, H. Ouyang // *Composite Structures*. – 2020. – Vol. 236. – 111862.
8. A novel quasi-zero-stiffness strut and its applications in six-degree-of-freedom vibration isolation platform / J. Zhou, Q. Xiao, D. Xu, H. Ouyang, Y. Li // *Journal of Sound and Vibration*. – 2017. – Vol. 394. – P. 59–74.
9. Sun X., Wang F., Xu J. Analysis, design and experiment of continuous isolation structure with Local Quasi-Zero-Stiffness property by magnetic interaction International // *Journal of Non-linear Mechanics*. – 2019. – Vol. 116. – P. 289–301.
10. Свешников В.К., Усов А.А. Станочные гидроприводы: справочник. – М.: Машиностроение, 1982. – 464 с.
11. Control of damping of structural vibrations by using different mechanisms of energy dissipation / D.A. Oshmarin, N.A. Iurlova, N.V. Sevodina, M.A. Iurlov // *Procedia Structural Integrity*. – 2021. – Vol. 32. – P. 158–165.
12. A hysteretic loop phenomenon at strain amplitude dependent damping curves of pre-strained pure Mg during cyclic vibration / J. Hu, D. Wan, Y. Hu, H. Wang, Y. Jiang, Y. Xue, L. Li // *Journal of Alloys and Compounds*. – 2021. – Vol. 886. – 161303.
13. Modeling of nonlinear vibration protection systems of mining machines / S.E. Ivanov, Z. Meleshkova, A. Mikalauskasi, L.N. Ivanova // *Procedia computer science*. – 2019. – Vol. 156. – P. 292–299.
14. Non-linear vibration protection systems phase-frequency characteristics measurement method and its research for polyharmonic model of vibration signal / L.A. Varzhitskii, G.V. Lazutkin, D.P. Davydov, O.S. Surkov, K.V. Boyarov // *Procedia Engineering*. – 2017. – Vol. 176. – P. 319–325.
15. Non-linear oscillations of mechanical systems with structure damping vibration protection devices / G.V. Lazutkin, D.P. Davydov, L.A. Varzhitskiy, K.V. Boyarov, T.V. Volkova // *Procedia Engineering*. – 2017. – Vol. 176. – P. 334–343.
16. Land-based sources of seismic signals / A.N. Gavrilin, E.A. Chuprin, B.B. Moyzes, E.A. Halabuzar // *Proceedings of 2014 International Conference on Mechanical Engineering, Automation and Control Systems, MEACS*. – 2014. – 6986947. DOI: 10.1109/MEACS.2014.6986947.
17. Radial-piston pump for drive of test machines / A.I. Nizhegorodov, A.N. Gavrilin, B.B. Moyzes, A.I. Cherkasov, O.M. Zharkevich, G.S. Zhetessova, N.A. Savelyeva // *IOP Conf. Series: Materials Science and Engineering*. – 2018. – Vol. 289. – № 1. – 012014. DOI: 10.1088/1757-899X/289/1/012014.
18. Алабужев П.М., Гритчин А.А., Ким Л.И. Виброзащитные системы с квазинулевой жесткостью. – Л.: Машиностроение, 1986. – 96 с.
19. Harris C., Piersol A. Harris' shock and vibration handbook. – New York: McGraw-Hill Professional, 2002. – 1568 p.
20. Tandon N., Nakra B. Vibration and noise engineering. – New Delhi, I.K. International Publ. House Pvt. Ltd., 2017. – 214 p.
21. Марочник статей и сплавов / под общ. ред. А.С. Зубченко. – М.: Машиностроение, 2003. – 784 с.
22. Industrial minerals & rocks: commodities, markets, and uses / ed. by J.E. Kogal. – Littleton: Society for Mining, Metallurgy, and Exploration Inc., 2006. – 1529 p.
23. Справочник технолога-машиностроителя / под ред. А.Г. Косиловой, Р.К. Мещерякова. – М.: Машиностроение, 1986. – 496 с.
24. Mechanical engineer's handbook / ed. by D.B. Marghitu. – London: Academic Press, 2001. – 876 p.
25. Edward H.S. Mechanical engineer's reference book. – Oxford: Butterworth-Heinemann, 2000. – 1194 p.
26. Czichos H. Handbook of technical diagnostics. Fundamentals and application to structures and systems. – Berlin: Springer, 2013. – 566 p.
27. Lockhart B. Mechanical engineering reference manual. – New York: NY Research Press, 2015. – 206 с.
28. Using the vibration recorder mobile diagnostic complex for studying vibration processes / B. Moyzes, A. Gavrilin, K. Kuvshinov, A. Smyshlyaev, I. Koksharova // *Material and Mechanical Engineering Technology*. – 2022. – № 3. – P. 50–57.
29. Hydraulic drive of vibration stand for testing the robotic systems units by random vibration method / A.I. Nizhegorodov, A.N. Gavrilin, B.B. Moyzes, K.A. Kuvshinov // *IOP Conference Series: Materials Science and Engineering*. – 2019. – Vol. 516 (1). – 012031.
30. Ahirrao N.S., Bhosle S.P., Nehete D.V. Dynamics and vibration measurements in engines // *Procedia Manufacturing*. – 2018. – Vol. 20. – P. 434–439.

Информация об авторах

Кирилл Александрович Кувшинов, старший преподаватель, отделение машиностроения Инженерной школы новых производственных технологий Национального исследовательского Томского политехнического университета, Россия, 634050, г. Томск, пр. Ленина, 30; kuvshinov@tpu.ru

Алексей Николаевич Гаврилин, доктор технических наук, профессор, отделение машиностроения Инженерной школы новых производственных технологий Национального исследовательского Томского политехнического университета, Россия, 634050, г. Томск, пр. Ленина, 30; <https://orcid.org/0000-0002-9205-2283>; gawral@tpu.ru

Борис Борисович Мойзес, кандидат технических наук, доцент, отделение контроля и диагностики Инженерной школы неразрушающего контроля и безопасности Национального исследовательского Томского политехнического университета, Россия, 634050, г. Томск, пр. Ленина, 30; <https://orcid.org/0000-0002-1938-1136>; mbb@tpu.ru

Анатолий Иванович Нижегородов, доктор технических наук, профессор, кафедра строительных, дорожных машин и гидравлических систем Национального исследовательского Иркутского государственного технического университета, Россия, 664074, г. Иркутск, ул. Лермонтова, 83; nastromo_irkutsk@mail.ru
Максим Алексеевич Кузнецов, студент, отделение машиностроения Инженерной школы новых производственных технологий Национального исследовательского Томского политехнического университета, Россия, 634050, г. Томск, пр. Ленина, 30; bb1998boss@mail.ru

Поступила в редакцию: 02.03.2024

Поступила после рецензирования: 15.05.2024

Принята к публикации: 09.09.2024

REFERENCES

1. Kochetov O.S. *Spring vibration isolator with pendulum suspension*. Patent RF, no. 2624130, 2017. (In Russ.)
2. Kuzmin E.N., Anikeev A.V., Zhiganov P.G. *Dynamic extinguisher*. Patent RF, no. 2101581, 1998. (In Russ.)
3. Kochetov O.S. *Vibration isolator for process equipment*. Patent RF, no. 2624120, 2006. (In Russ.)
4. Ismagilov M.R., Zotov A.N. *Vibration-proof jackhammer handle*. Patent RF, no. 2578299, 2016. (In Russ.)
5. *Comparative analysis of vibration protection systems*. (In Russ.) Available at: <http://vibro-lab.ru/sravnit-vibroizolyatori>; (accessed 27 May 2024).
6. Xie B., Sheng M. Ultralow-frequency band gap in a quasi-zero-stiffness multi-resonator periodic hybrid structure. *Wave Motion*, 2021, vol. 107, art. no. 102825.
7. Cai C., Zhou J., Wu L., Wang K., Xu D., Ouyang H. Design and numerical validation of quasi-zero-stiffness metamaterials for very low-frequency band gaps. *Composite Structures*, 2020, vol. 236, art. no. 111862.
8. Zhou J., Xiao Q., Xu D., Ouyang H., Li Y. A novel quasi-zero-stiffness strut and its applications in six-degree-of-freedom vibration isolation platform. *Journal of Sound and Vibration*, 2017, vol. 394, pp. 59–74.
9. Sun X., Wang F., Xu J. Analysis, design and experiment of continuous isolation structure with Local Quasi-Zero-Stiffness property by magnetic interaction. *International Journal of Non-linear Mechanics*, 2019, vol. 116, pp. 289–301.
10. Sveshnikov V.K., Usov A.A. *Machine hydraulic drives: reference*. Moscow, Mashinostroenie Publ., 1982. 464 p. (In Russ.)
11. Oshmarin D.A., Iurlova N.A., Sevodina N.V., Iurlov M.A. Control of damping of structural vibrations by using different mechanisms of energy dissipation. *Procedia Structural Integrity*, 2021, vol. 32, pp. 158–165.
12. Hu J., Wan D., Hu Y., Wang H., Jiang Y., Xue Y., Li L. A hysteretic loop phenomenon at strain amplitude dependent damping curves of pre-strained pure Mg during cyclic vibration. *Journal of Alloys and Compounds*, 2021, vol. 886, art. no. 161303.
13. Ivanov S.E., Meleshkova Z., Mikalauskas A., Ivanova L.N. Modeling of nonlinear vibration protection systems of mining machines. *Procedia computer science*, 2019, vol. 156, pp. 292–299.
14. Varzhitskii L.A., Lazutkin G.V., Davydov D.P., Surkov O.S., Boyarov K.V. Non-linear vibration protection systems phase-frequency characteristics measurement method and its research for polyharmonic model of vibration signal. *Procedia Engineering*, 2017, vol. 176, pp. 319–325.
15. Lazutkin G.V., Davydov D.P., Varzhitskiy L.A., Boyarov K.V., Volkova T.V. Non-linear oscillations of mechanical systems with structure damping vibration protection devices. *Procedia Engineering*, 2017, vol. 176, pp. 334–343.
16. Gavrilin A.N., Chuprin E.A., Moyzes B.B., Halabuzar E.A. Land-based sources of seismic signals. *Proceedings of 2014 International Conference on Mechanical Engineering, Automation and Control Systems, MEACS (2014)*. 2014, art. no. 6986947. doi: 10.1109/MEACS.2014.6986947.
17. Nizhegorodov A.I., Gavrilin A.N., Moyzes B.B., Cherkasov A.I., Zharkevich O.M., Zhetessova G.S., Savelyeva N.A. Radial-piston pump for drive of test machines. *IOP Conf. Series: Materials Science and Engineering*, 2018, vol. 289, no. 1, art. no. 012014. DOI: 10.1088/1757-899X/289/1/012014.
18. Alabuzhev P.M., Gritchin A.A., Kim L.I. *Vibration protection systems with quasi-zero rigidity*. Leningrad, Mashinostroenie Publ., 1986. 96 p. (In Russ.)
19. Harris C., Piersol A. *Harris' shock and vibration handbook*. New York, McGraw-Hill Professional, 2002. 1568 p.
20. Tandon N., Nakra B. *Vibration and noise engineering*. New Delhi, I.K. International Publ. House Pvt. Ltd., 2017. 214 p.
21. *Steel grade guide*. Ed. by A.S. Zubchenko. Moscow, Mashinostroenie Publ., 2003. 784 p. (In Russ.)
22. *Industrial minerals & rocks: commodities, markets, and uses*. Ed. by J.E. Kogal. Littleton, Society for Mining, Metallurgy, and Exploration Inc., 2006. 1529 p.
23. *Handbook of a machine-building technologist*. Eds. A.G. Kosilova, R.K. Mesheryakov. Moscow, Mashinostroenie Publ., 1986. 496 p. (In Russ.)
24. *Mechanical engineer's handbook*. Ed. by Dan B. Marghitu. London, Academic Press, 2001. 876 p.
25. Edward H.S. *Mechanical engineer's reference book*. Oxford, Butterworth-Heinemann, 2000. 1194 p.
26. Czichos H. *Handbook of technical diagnostics. Fundamentals and application to structures and systems*. Berlin, Springer Verlag Berlin Heidelberg, 2013. 566 p.
27. Lockhart B. *Mechanical engineering reference manual*. New York, NY Research Press, 2015. 206 p.
28. Moyzes B., Gavrilin A., Kuvshinov K., Smyshlyaev A., Koksharova I. Using the vibration recorder mobile diagnostic complex for studying vibration processes. *Material and Mechanical Engineering Technology*, 2022, vol. 3, pp. 50–57.
29. Nizhegorodov A.I., Gavrilin A.N., Moyzes B.B., Kuvshinov K.A. Hydraulic drive of vibration stand for testing the robotic systems units by random vibration method. *IOP Conference Series: Materials Science and Engineering*, 2019, vol. 516 (1), 012031.
30. Ahirrao N.S., Bhosle S.P., Nehete D.V. Dynamics and vibration measurements in engines. *Procedia Manufacturing*, 2018, vol. 20, pp. 434–439.

Information about the authors

Kirill A. Kuvshinov, Chief Lecturer, National Research Tomsk Polytechnic University, 30, Lenin avenue, Tomsk, 634050, Russian Federation; kuvshinov@tpu.ru

Alexey N. Gavrilin, Dr. Sc., Professor, National Research Tomsk Polytechnic University, 30, Lenin avenue, Tomsk, 634050, Russian Federation; <https://orcid.org/0000-0002-9205-2283>; gawral@tpu.ru

Boris B. Moyzes, Cand. Sc., Associate Professor, National Research Tomsk Polytechnic University, 30, Lenin avenue, Tomsk, 634050, Russian Federation; <https://orcid.org/0000-0002-1938-1136>; mbb@tpu.ru

Anatoliy I. Nizhegorodov, Dr. Sc., Professor, Irkutsk National Research Technical University, 83, Lermontov street, Irkutsk, 664074, Russian Federation; nastromo_irkutsk@mail.ru

Maksim A. Kuznetsov, Student, National Research Tomsk Polytechnic University, 30, Lenin avenue, Tomsk, 634050, Russian Federation; bb1998boss@mail.ru

Received: 02.03.2024

Revised: 15.05.2024

Accepted: 09.09.2024

УДК 621.313
DOI: 10.18799/24131830/2024/9/4724
Шифр специальности ВАК: 2.4.2

Электромеханические процессы в электроусилителе руля на основе синхронного двигателя с постоянными магнитами

А.Г. Гарганеев^{1✉}, А.И. Ибрагим², Д.И. Ульянов¹, А.А. Антропов²

¹Национальный исследовательский Томский политехнический университет Россия, г. Томск

²АО Муромский машиностроительный завод, Россия, г. Томск

✉ tpbalex13@tpu.ru

Аннотация. Актуальность. Электроусилители рулевого управления транспортных средств успешно конкурируют с аналогичными по назначению гидроусилителями, показывая высокую эффективность, экономию энергии и экологичность. **Цель:** исследование электромеханических процессов в электроусилителе руля на основе синхронного двигателя с постоянными магнитами. **Методы:** математическое и компьютерное моделирование с использованием программного комплекса MatLab/Simulink. **Результаты:** Рассмотрены режимы работы электроусилителя рулевого управления на основе электрического двигателя с постоянными магнитами. Проанализированы две классические схемы построения систем рулевого управления с электроусилителем руля – с размещением электродвигателя на рулевой колонке и на рулевой рейке. Разработаны структурные схемы механической и электрической частей системы рулевого управления. На основе математических зависимостей, характеризующих режимы работы системы рулевого управления, на платформе MATLAB/Simulink получена полная динамическая имитационная модель электроусилителя. На основе предварительного анализа методов и алгоритмов управления в системе для решения задачи устойчивости управления реализованы ПИ-контроллеры с фильтрами нижних частот для регулирования тока и напряжения электродвигателя в зависимости от скорости автомобиля и угла поворота рулевых колес. Результаты моделирования были использованы при проектировании реального электроусилителя рулевого управления конкретного транспортного средства. **Выводы.** Полученная авторами полная имитационная модель электроусилителя на основе синхронного двигателя с постоянными магнитами в системе рулевого управления автомобиля адекватно отображает динамические процессы управления и может быть использована при проектировании транспортных средств автомобильного типа.

Ключевые слова: автомобиль, электроусилитель руля, скорость, момент, контроллер

Для цитирования: Электромеханические процессы в электроусилителе руля на основе синхронного двигателя с постоянными магнитами / А.Г. Гарганеев, И.А. Ибрагим, Д.И. Ульянов, А.А. Антропов // Известия Томского политехнического университета. Инжиниринг георесурсов. – 2024. – Т. 335. – № 9. – С. 128–136. DOI: 10.18799/24131830/2024/9/4724

UDC 621.313
DOI: 10.18799/24131830/2024/9/4724

Electromechanical processes in electric power steering system based on permanent magnet synchronous motor

A.G. Garganeev^{1✉}, Ahmed Ibrahim², D.I. Ulyanov¹, A.A. Antropov²

¹National Research Tomsk Polytechnic University, Tomsk, Russian Federation

²Research and Development center JSC Murom Machine-Building Plant, Tomsk, Russian Federation

✉ tpbalex13@tpu.ru

Abstract. Relevance. Electric power steering of vehicles successfully competes with hydraulic boosters of similar purposes, showing high efficiency, energy saving and environmental friendliness. **Aim.** To study and research electromechanical processes of electric power steering system based on permanent magnet synchronous motor. **Methods.** Mathematical and nu-

merical modeling using the Matlab/Simulink software package. **Results.** The article discusses the operating modes of an electric power steering based on an electric motor with permanent magnets. The authors analyzed two classic schemes for constructing steering systems with electric power steering – with the electric motor placed on the steering column and on the steering rack. Block diagrams of the mechanical and electrical parts of the steering system have been developed. Based on mathematical dependencies characterizing the operating modes of the steering system, a complete dynamic simulation model of the electric power amplifier was obtained on the MATLAB/Simulink platform. Based on a preliminary analysis of control methods and algorithms in the system to solve the problem of control stability, PI controllers with low-pass filters are implemented to regulate the current and voltage of the electric motor depending on the speed of the vehicle and the angle of rotation of the steering wheels. The simulation results were used to design a real electric power steering for a specific vehicle. **Conclusions.** The complete simulation model of an electric booster based on a synchronous motor with permanent magnets in a car steering system obtained by the authors adequately reflects the dynamic control processes and can be used in the design of automotive vehicles.

Keywords: automobile, electric power steering, speed, torque, controller

For citation: Garganeev A.G., Ibrahim Ahmed, Ulyanov D.I., Antropov A.A. Electromechanical processes in electric power steering system based on permanent magnet synchronous motor. *Bulletin of the Tomsk Polytechnic University. Geo Assets Engineering*, 2024, vol. 335, no. 9, pp. 128–136. DOI: 10.18799/24131830/2024/9/4724

Введение

Электроусилители рулевого управления («электроусилитель руля» – ЭУР) транспортных средств (ТС) успешно конкурируют с аналогичными по назначению гидроусилителями, показывая высокую эффективность, экономию энергии и экологичность [1, 2]. Существенным преимуществом систем управления с ЭУР является возможность изменения уровня управляющего усилия на рулевом колесе при изменении скорости движения ТС (рис. 1). В составе электромеханической системы ЭУР для создания компенсирующего момента могут применяться различные виды электрических машин, однако используемый в настоящее время синхронный двигатель с постоянными магнитами (Permanent Magnet Synchronous Motor – PMSM) имеет ряд преимуществ над другими, например, высокие удельные показатели мощности и крутящего момента [3]. В зависимости от расположения PMSM в трансмиссии различают «колонные» (размещение на рулевой колонке) и «реечные» (размещение на рулевой рейке) [4, 5]. В колонном исполнении PMSM устанавливается вместе с редуктором на рулевой колонке. В «реечной» конфигурации электродвигатель соединен непосредственно с валом рейки через редуктор [6].

Сигналы управления электродвигателем в составе ЭУР формируются в электронном блоке управления (ЭБУ), содержащем контроллер и инвертор напряжения. Алгоритмы, реализуемые в ЭБУ, могут использовать различные принципы, например линейно-квадратичное гауссово управление (Linear Quadratic Gaussian – LQG) [7], нечеткое управление [8, 9] или робастный регулятор (H_∞) [10]. Однако, как правило, пропорциональные интегральные (ПИ) регуляторы, имея простую структуру, могут эффективно решать задачу управления движением ТС при легкой схемотехнической реализации [11, 12].

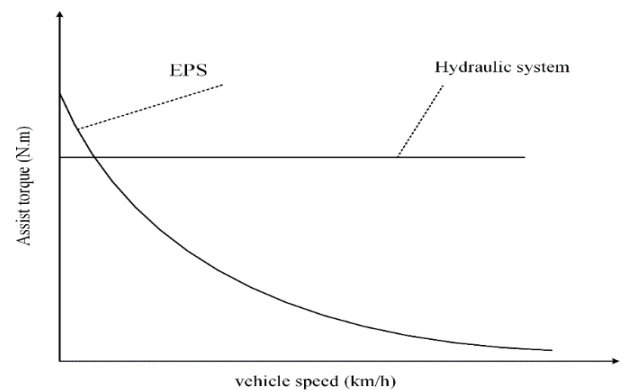


Рис. 1. Характеристики ЭУР и гидросистемы

Fig. 1. General characteristics of electric power steering system (EPS) and hydraulic system

Цель исследования – электромеханические процессы в электроусилителе руля на основе синхронного двигателя с постоянными магнитами.

Механическая часть системы ЭУР

На рис. 2 представлены кинематические схемы ЭУР «колонного» и «реечного» типа. Обе схемы состоят из: рулевой колонки, датчика крутящего момента, рулевого колеса, дополнительного редуктора (например, червячного типа, шкива, шариковинтовой пары – ШВП), реечной передачи. Следует отметить, что первая конфигурация ЭУР подходит для компактных автомобилей с выходом усилия на рейке до 6 кН, а ЭУР «реечного» типа – для транспортных средств среднего и большого размера с высоким действующим усилием.

Датчик крутящего момента измеряет входной крутящий момент, прикладываемый водителем к рулевому колесу, и контролирует положение рулевого колеса. Также датчик скорости ТС формирует сигнал его скорости движения. Эти сигналы поступают в ЭБУ для обработки и определяют величину

вспомогательного (компенсирующего) крутящего момента, формируемого электродвигателем, что помогает снизить усилия водителя [13, 14].

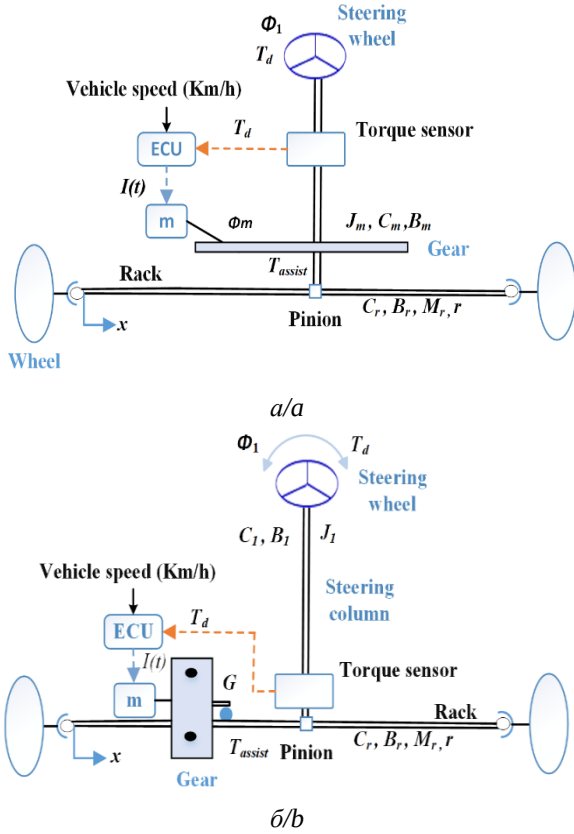


Рис. 2. Кинематические схемы ЭУР: а) ЭУР колонного типа; б) ЭУР реечного типа почему на англ?
Fig. 2. Structure of EPS: a) column-type EPS; b) rack-type EPS

На основании кинематических схем на рис. 3 представлена расчетная схема механической части ЭУР [15].

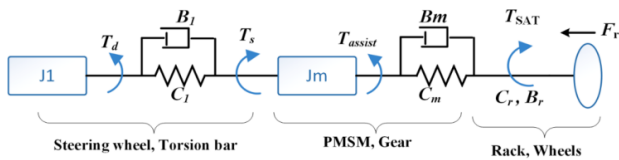


Рис. 3. Расчетная схема механической части ЭУР
Fig. 3. Mechanical design scheme of EPS model

Динамические процессы механической части ЭУР описываются следующими уравнениями:

$$J_1 \ddot{\phi}_1 = T_d - B_1 \dot{\phi}_1 - C_1 (\phi_1 - \phi_r), \quad (1)$$

$$T_s = C_1 (\phi_1 - \phi_r), \quad (2)$$

$$J_m \ddot{\phi}_m = T_{assist} - B_m \dot{\phi}_m - C_m (\phi_m - G \phi_r), \quad (3)$$

$$M_r \ddot{x} = \frac{1}{r} [C_m (\phi_m - G \phi_r) G + C_1 (\phi_1 - \phi_r)] - F_r - T_{sat}. \quad (4)$$

Силу трения рулевой системы F_r , полученную из уравнения нелинейного движения, можно выразить следующим образом:

$$F_r = -C_r x - B_r \dot{x}, \quad (5)$$

где J_1, J_m – моменты инерции рулевого колеса и колонки, ротора двигателя; ϕ_1, ϕ_m, ϕ_r – углы поворота рулевого колеса, вала двигателя и шестерни и рейки; T_d, T_s, T_{assist} – крутящий момент от водителя, крутящий момент рулевого управления, измеренный датчиком крутящего момента, и крутящий момент электродвигателя; C_1, C_m – крутильные жесткости рулевой колонки и вала электродвигателя; B_1, B_m – коэффициенты демпфирования рулевой колонки и электродвигателя; B_r, C_r – коэффициенты демпфирования стойки и жесткости пружин и шин; F_r, T_{sat} – сила трения системы рулевого управления и момент самовыравнивания системы ЭУР; M_r, G, r, x – масса рейки, передаточное число двигателя, радиус шестерни и смещение рейки.

Момент самовыравнивания T_{sat} определяет механизм возврата колес в центральное положение после окончания поворота. Рис. 4 поясняет принцип оценки T_{sat} при самовыравнивании передних колес.

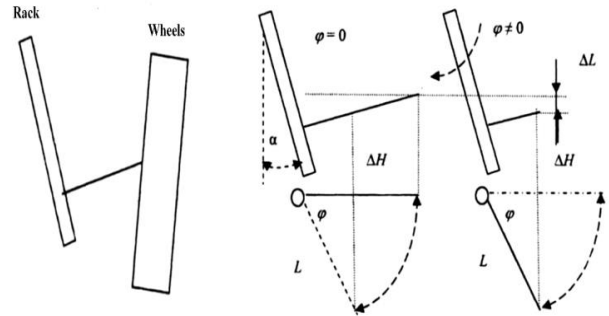


Рис. 4. Механизм самовыравнивания передних колес
Fig. 4. Mechanism of self-aligning torque (SAT) from the wheels

Эффект самовыравнивания колес в центральное положение после окончания поворота происходит в соответствии с выражениями:

$$T_{SAT} = -K \sin(\phi), \quad (6)$$

$$K = ML \sin(\alpha), \quad (7)$$

где α – угол поворота колеса относительно продольного положения корпуса автомобиля; M – мас-

са автомобиля на одно колесо; L – длина оси поворота цапфы.

Из (6) можно заметить, что в состоянии покоя автомобиля ($\varphi=0$), самовозврата колес нет.

На основе уравнений (1)–(7) структурная схема механической части ЭУР представлена на рис. 5.

Электрическая часть системы ЭУР

А. Моделирование электродвигателя

Математическое уравнение для моделирования PMSM в координатах DQ (8) имеет следующий вид [16, 17]:

$$\begin{bmatrix} \dot{v}_d \\ \dot{v}_q \end{bmatrix} = \begin{bmatrix} R_s + L_d S & -L_q \\ L_d & R_s + L_q S \end{bmatrix} \begin{bmatrix} i_d \\ i_q \end{bmatrix} + \begin{bmatrix} 0 \\ \psi_f \end{bmatrix} \omega_e, \quad (8)$$

где R_s – сопротивление статора; L_d, L_q – индуктивность СДПМ по продольной и поперечной осям; v_d, v_q – напряжение на клеммах статора по продольной и поперечной осям; i_d, i_q – намагничивающий и активный ток двигателя соответственно; ψ_f – потокосцепление, создаваемое постоянным магнитом; ω_e – электрическая угловая скорость.

Электромагнитный момент двигателя и уравнение движения PMSM (9)–(11) определяется следующим образом [17]:

$$T_e = p[\psi_f i_q + (L_q - L_d)i_d i_q] = k_t i_q, \quad (9)$$

$$T_e - T_L = J \dot{\omega}_m - B_m \omega_m, \quad (10)$$

$$\omega_e = \frac{\omega_m}{p}, \quad (11)$$

где p – количество пар полюсов; k_t – постоянная крутящего момента двигателя; ω_m – механическая угловая скорость ротора; T_e, T_L – электромагнитный и механический крутящий момент соответственно.

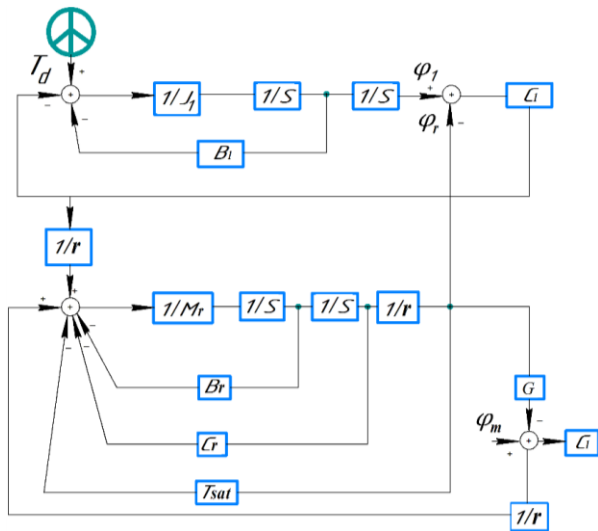


Рис. 5. Структурная схема механической части ЭУР

Fig. 5. Diagram of mechanical part electric power steering

Б. Моделирование системы управления ЭУР

Для повышения комфорта и безопасности вождения ТС необходимо учесть связь между крутящим моментом на рулевом колесе и скоростью ТС [18, 19]. При линейной взаимосвязи тока и момента электродвигателя задание на момент в виде опорного тока I_{ref} можно представить в следующем виде:

$$I_{ref} = \begin{cases} 0, & 0 \leq T_d \leq T_{d0}; \\ k(v)(T_d - T_{d0}), & T_{d0} < T_d < T_{dmax}; \\ k(v)(T_{dmax} - T_{d0}), & T_d \geq T_{dmax}, \end{cases} \quad (12)$$

где $k(v)$ – коэффициент скорости ТС.

Из системы уравнений (12) видно, что T_{d0} представляет собой минимальный крутящий момент, при котором датчик крутящего момента начинает процесс измерения. Зону ($0 \leq T_d < T_{d0}$) можно рассматривать как «мертвую», в которой вспомогательный двигатель не оказывает никакого действия на механическую систему. Кроме того, датчик крутящего момента может выдавать сигнал до значения T_{dmax} , после этого его выход насыщается. По рекомендации авторов [1, 6, 8] минимальное и максимальное значения ощущения крутящего момента водителя находятся соответственно в диапазоне от 1 до 7 Нм. Стоит отметить, что рулевой механизм имеет максимальное сопротивление при неподвижном ТС, поэтому электродвигатель должен обеспечивать в этом режиме максимальный вспомогательный крутящий момент [20]. При увеличении скорости ТС сопротивление рулевого механизма будет уменьшаться, поэтому вспомогательный момент электродвигателя следует уменьшить (рис. 1). Чтобы обеспечить хорошее ощущение дороги, минимальная скорость ТС v_{min} обычно выбирается равной 0 км/ч, а максимальное значение v_{max} составляет 100 км/ч. Тогда общее уравнение коэффициента скорости ТС (13) можно представить, как:

$$k(v) = a + bv + cv^2. \quad (13)$$

В качестве примера авторы исследовали спроектированный электродвигатель для ЭУР ТС массой 5 т. Когда скорость равна нулю, максимальный вспомогательный ток исследуемой системы ЭУР был равен 102 А, поэтому первый коэффициент a (14) можно рассчитать при максимальном крутящем моменте водителя следующим образом:

$$k(v)_1 = a = \frac{I_{ref}}{T_{dmax} - T_{d0}} = \frac{102}{7 - 1} = 17. \quad (14)$$

В табл. 1 приведены результаты расчета коэффициента усиления при различных скоростях и максимальном крутящем моменте 7 Нм. Используя аппроксимацию кривой, можно получить два других коэффициента $k(v)$ (15) следующим образом:

$$k(v) = 17 - 0,21v + 0,0004v^2. \quad (15)$$

Таблица 1. Значения коэффициента усиления от скорости автомобиля

Table 1. Assist coefficient under different velocities

Скорость автомобиля (км/ч) Vehicle speed (km/h)	$k(v)$
0	17
20	10
40	8
60	5
80	3
100	0

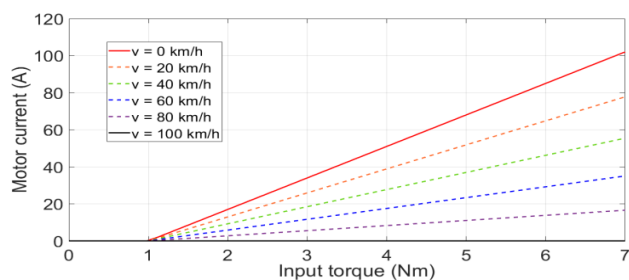


Рис. 6. Зависимости тока электродвигателя от требуемого компенсирующего момента

Fig. 6. Linear characteristics curve of EPS system

Таким образом, для любого типа ТС могут быть получены требуемые характеристики с последующим их использованием в контроллере системы ЭУР. В качестве примера на рис. 6 представлено семейство характеристик зависимости тока электродвигателя от требуемого компенсирующего момента при различных скоростях движения для ТС массой 5 т.

С. Структурная схема системы управления ЭУР

На рис. 7 показана структурная схема системы ЭУР. Вся система построена на известных принципах реализации векторного управления с добавлением новых механических связей и переменных и при учете функциональных зависимостей, представленных выше.

Токи вспомогательного электродвигателя содержат гармоническую составляющую, которая может вызвать автоколебания в системе ЭУР и неустойчивую работу системы. Поэтому в системе реализованы два фильтра нижних частот q, d тока с частотой среза 20 кГц. PMSM приводится в действие трехфазным инвертором напряжения с питанием от источника постоянного тока 48 В. Датчик Холла оценивает угол положения ротора двигателя PMSM. Коэффициенты усиления ПИ-регуляторов (16), (17) определялись по следующим уравнениям [17]:

$$k_{p-d} = \frac{L_d f_{PWM}}{2}, k_{p-q} = \frac{L_q f_{PWM}}{2}, \quad (16)$$

$$k_i = \frac{R_s f_{PWM}}{2}, \quad (17)$$

где k_{p-d} , k_{p-q} – коэффициенты усиления ПИ-регуляторов токов по осям d и q ; R_s – сопротивление обмотки PMSM.

Полная система ЭУР и результаты

Система ЭУР была смоделирована с использованием платформы Matlab (рис. 8) с временем выборки 0,2 мкс.

Параметры электромеханической системы ЭУР, применяемые при моделировании, представлены в табл. 2.

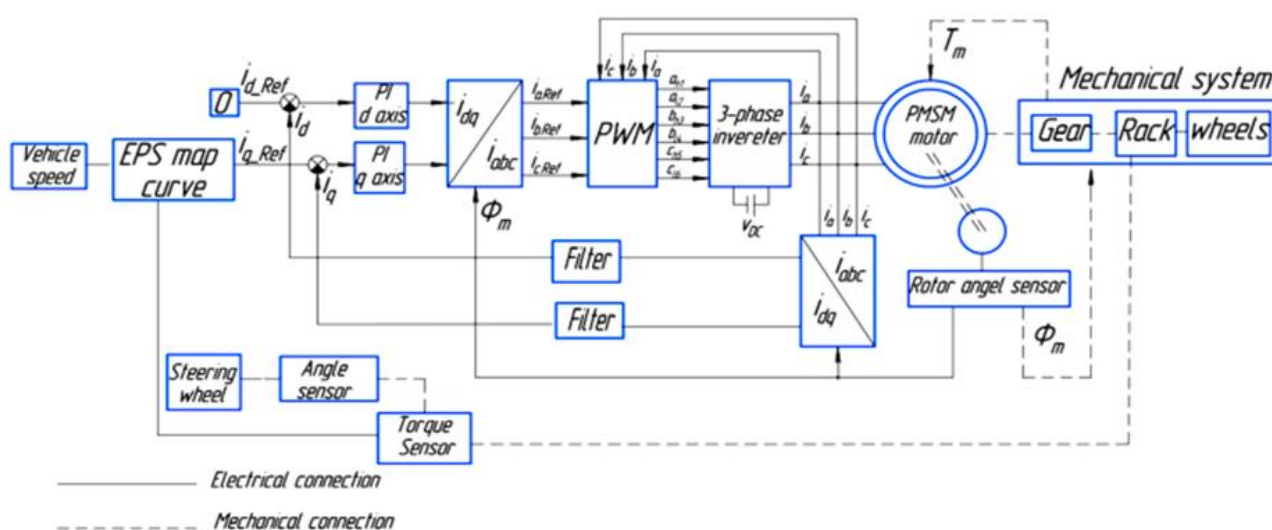


Рис. 7. Структурная схема системы управления ЭУР

Fig. 7. Structure of EPS

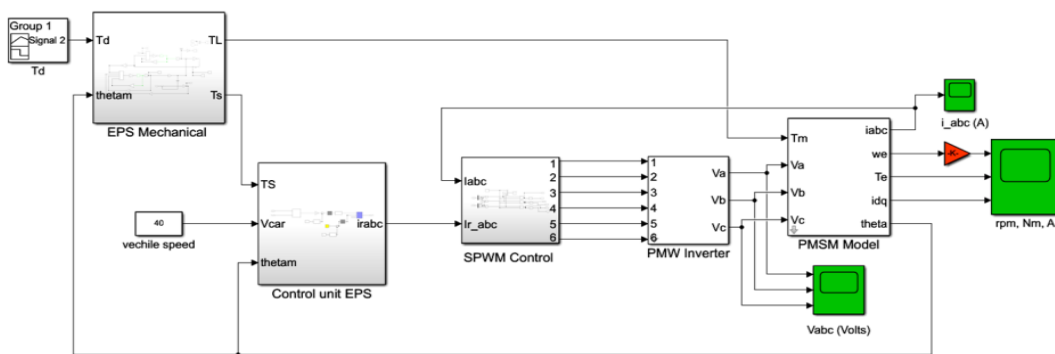


Рис. 8. Полная система ЭУР в Matlab/simulink
Fig. 8. Matlab/simulink of the proposed EPS system

Таблица 2. Параметры системы ЭУР
Table 2. Parameters of EPS system

Параметр Parameter	Величина Value
Сопротивление обмотки статора, R_s , Ом Stator winding resistance, R_s , Ohm	0,0188
Число пар полюсов, p Number of pole pairs, p	3
Потокоцепление постоянных магнитов на полюс Ψ_f , Вб Flux linkage of permanent magnets per pole Ψ_f , Wb	0,0153
Индуктивность, L_d , мГн Inductance, L_d , mH	0,0335
Индуктивность, L_q , мГн Inductance, L_q , mH	0,0434
Момент инерции рулевого колеса и колонки, J_1 , кг м ² Moment of inertia of the steering wheel and column, J_1 , kg m ²	0,0012
Жесткость торсионного вала, C_1 , Нм/рад Torsion shaft rigidity, C_1 , Nm/rad	115
Коэффициент демпфирования упругих колебаний торсионного вала, B_1 , Нм/(рад/с) Damping coefficient of elastic vibrations of the torsion shaft, B_1 , Nm/(rad/s)	0,26
Момент инерции электродвигателя J_m , кг м ² Electric motor inertia moment J_m , kg m ²	0,00176
Жесткость электродвигателя, C_m , Нм/рад Electric motor stiffness, C_m , Nm/rad	125
Коэффициент демпфирования электродвигателя B_m , Нм/(рад/с) Electric motor damping coefficient B_m , Nm/(rad/s)	0,00003
Передаточное число редуктора двигателя, G Engine gear ratio, G	2,9
Радиус шестерни r , м Gear radius r , m	0,012
Масса рейки M , кг Rack weight M , kg	22
Коэффициент демпфирования рейки B_r , Н/(м/с) Rack damping coefficient B_r , N/(m/s)	653,203
Коэффициент жесткости шины C_r , Н/м Tire stiffness coefficient C_r , N/m	1200
Постоянная крутящего момента двигателя k_m , Нм/А Engine torque constant k_m , Nm/A	0,069

На рис. 9 показана реакция системы ЭУР при входном синусоидальном сигнале при нулевой скорости ТС. Как видно из рис. 9, электродвигатель создает компенсирующий момент лишь в том случае, если входной крутящий момент водителя превышает или равен 1 Нм.

Электродвигатель с редуктором обеспечивает максимальный вспомогательный крутящий момент 18 Нм при входном крутящем моменте, равном 7 Нм, что помогает улучшить ощущение управления водителем. На рис. 10 показан соответствующий ток электродвигателя при неподвижном ТС.

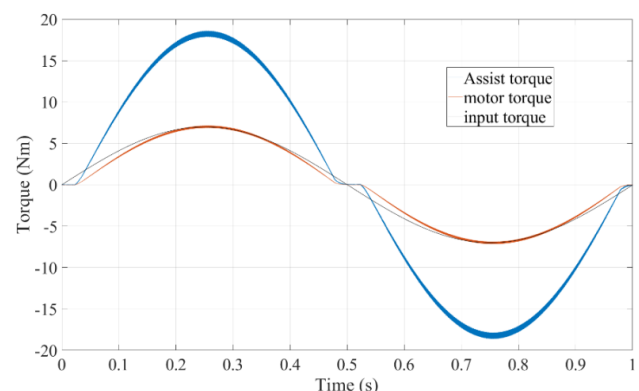


Рис. 9. Результаты моделирования формирования моментов ЭУР при скорости автомобиля 0 км/ч
Fig. 9. Results of modeling the formation of power steering torques at a vehicle speed of 0 km/h

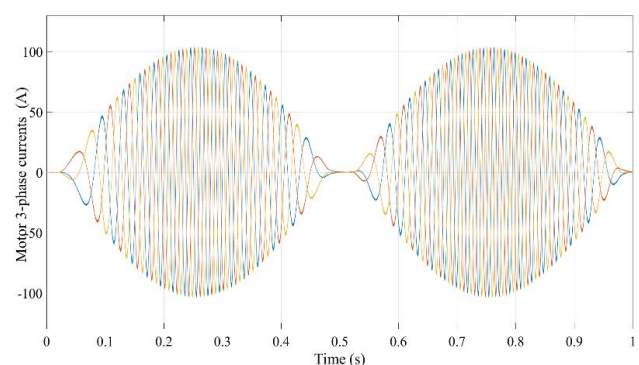


Рис. 10. Фазный ток электродвигателя ЭУР в соответствии с рис. 9
Fig. 10. Phase current of the EPS electric motor in accordance with Fig. 9

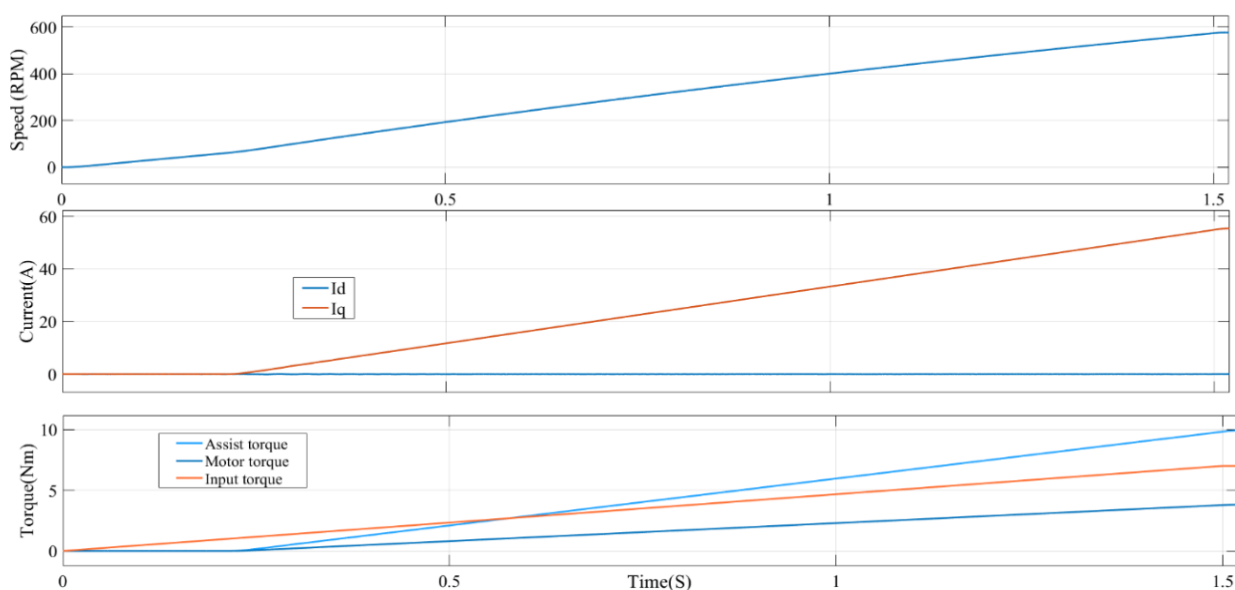


Рис. 11. Результаты моделирования системы ЭУР при скорости ТС 40 км/ч

Fig. 11. Simulation results of the input driver torque, motor torque and assist torque at a vehicle speed of 40 Km/h

Из рис. 10 можно сделать вывод, что ток двигателя имеет максимальное значение, когда крутящий момент равен 7 Нм. Пульсации крутящего момента и тока находятся в диапазоне $\pm 1,2\%$. На рис. 11 показана реакция системы ЭУР при входном линейном сигнале и скорости ТС 40 км/ч.

Как видно из рис. 11, компенсирующий момент формируется исключительно током по оси q , так как конструкция электродвигателя не предполагает возникновения ослабления поля при изменении угла нагрузки. Поэтому регуляторы тока настроены на формирование нулевого значения тока по оси d .

Компенсирующий момент обратно пропорционален скорости автомобиля.

На рис. 12 представлена зависимость максимального компенсирующего момента (при моменте на входном валу более 7 Нм) от скорости движения автомобиля.

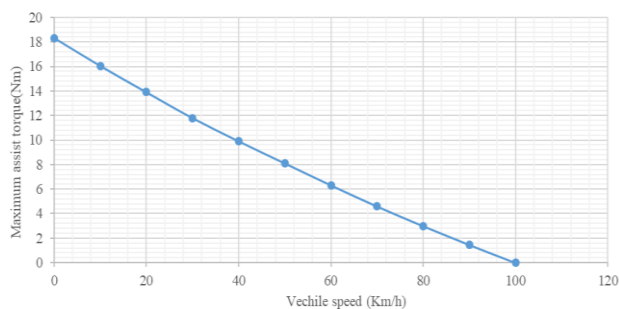


Рис. 12. Зависимость максимального компенсирующего момента от скорости движения автомобиля

Fig. 12. Dependence of maximum assist torque on the vehicle speed

На рис. 13 показано смещение рейки от центрального положения до точки остановки. Скорость рейки имеет значение 0,37 м/с для поворота колес при входном крутящем моменте водителя, равном 7 Нм, с эквивалентной силой, равной 11 кН.

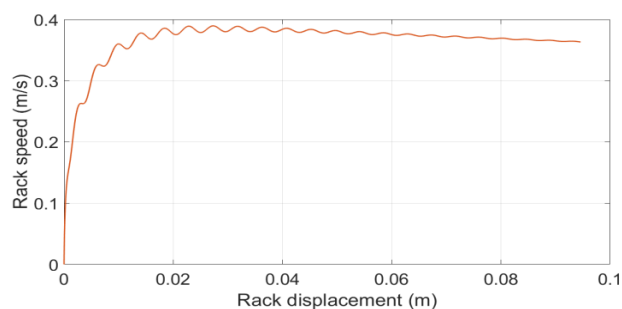


Рис. 13. Смещение рулевой рейки ЭУР от центрального положения до точки остановки в соответствии с рис. 9

Fig. 13. Displacement of EPS system rack from central position to a rest point according to Fig. 9

Заключение

Проведенные исследования позволяют сделать вывод о том, что полученная авторами полная имитационная модель ЭУР на основе синхронного двигателя с постоянными магнитами в системе рулевого управления ТС адекватно отображает соответствующие динамические электромеханические процессы. Модель не только является инструментом исследования различных режимов работы и частей ЭУР, но и позволяет учитывать целый ряд

параметров механической системы ТС, например массу, скорость, коэффициенты трения на различных поверхностях дорожного покрытия, характе-

ристики шин и подвески, углы рулевой трапеции и т. п., что в конечном итоге ведет к повышению комфортности и безопасности вождения ТС.

СПИСОК ЛИТЕРАТУРЫ

1. Shi G., Zhao S., Min J. Simulation analysis for electric power steering control system based on permanent magnetism synchronization motor // Proc. of the 2nd International Conference on Electronic and Mechanical Engineering and Information Technology. – France, 2012. – P. 1778–1783. DOI: 10.2991/emeit.2012.394.
2. Hiremath R.R., Isha T.B. Modelling and simulation of electric power steering system using permanent magnet synchronous motor // IOP Conf. Ser. Mater. Sci. Eng. – 2019. – Vol. 561. – № 1.
3. Математическая модель электроусилителя руля / В.А. Арефьев, А.М. Банов, С.И. Братчиков, Н.А. Болоян, В.А. Вершигора, В.В. Кашканов, Ю.В. Михеев, А.В. Нетесанов, М.Х. Салахов // Проблемы развития автомобилестроения в России: Докл. Междунар. науч.-практ. конф. – Тольятти, октябрь, 1998. – С. 123–129.
4. Королев В.В. Система электромеханического усилителя рулевого управления: дис. ... канд. техн. наук. – Тольятти, 2005. – 188 с.
5. Mohammed I.A., Hamza A. Electric power-assisted steering: a review // 2019 2nd Int. Conf. IEEE Niger. Comput. Chapter. – Niger, 2019, October 2019. – P. 501–507.
6. Lee J., Chang H.J., Ahn H.S. Explicit MPC for column-type EPS systems // IET Electr. Power Appl. – 2020. – Vol. 14. – № 1. – P. 91–100.
7. Ciarla V. Control of an electronic power steering system for people with reduced mobility // University of Grenoble. – 2014. – Vol. 14. – № 2. – P. 3–25.
8. A vector controlled drive system for electrically power assisted steering using hall-effect sensors / R.R. Sorial, M.H. Soliman, H.M. Hasanien, H.E.A. Talaat // IEEE Access. – 2021. – Vol. 9. – P. 116485–116499.
9. Rodrigues M.R., Teixeira E.L.S., Santos M.M.D. Design of a parameterized model predictive control for electric power assisted steering // Control Eng. Pract. – 2019 July. – Vol. 90. – P. 331–341.
10. Du P.P., Su H., Tang G.Y. Active return-to-center control based on torque and angle sensors for electric power steering systems // Sensors (Switzerland). – 2018. – Vol. 18. – № 3. – P. 1–12.
11. Nemes R.O., Ruba M., Martis C. Integration of real-time electric power steering system Matlab/Simulink Model into National Instruments VeriStand Environment // Proc. IEEE 18th Int. Conf. Power Electron. Motion Control. PEMC. – Romania, 2018. – P. 201–205.
12. Li Z., Wenjiang W. Study on stability of electric power steering system // 2008 IEEE Int. Conf. Robot. Autom. Mechatronics, RAM 2008. – China, 2008. – № Csic. – P. 368–372.
13. Xiaolin Zhang, Jiming Ma. Design and simulation of electric power steering system // Computer Simulation. – 2014 March. – Vol. 31. – P. 175–178.
14. Liang Xiong, Heping Liu, Donglin Peng. A control strategy for automotive electric power steering system without torque senso // Automotive Engineering, Beijing. – August 2013. – Vol. 35. – P. 711–715.
15. Evaluation of EPS control strategy using driving simulator for EPS / Toshihide Satake, Masahiko Kurishige, Noriyuki Inoue, Katsuya Ikemoto, Takayuki Kifuku and Kazumichi Tsutsumi // SAE Technical paper. DOI: 10.4271/2003-01-0582, March 2003
16. Zihui W., Zewei C., Zhiyuan H. Improved fast method of initial rotor position estimation for interior permanent magnet synchronous motor by symmetric pulse voltage injection // IEEE Access. – 2020. – Vol. 8. – P. 59998–60007.
17. Чернышев А.Ю., Дементьев Ю.Н., Чернышев И.А. Электропривод переменного тока. – М.: Юрайт, 2022. – 214 с.
18. Nonlinear characteristics compensation of inverter for low-voltage delta-connected induction motor / Qiang Guo, Zhiping Dong, Heping Liu, Xiaoyao You // Energies. – 2020. – Vol. 13. – № 3. – P. 303–314.
19. Gözü M., Ozkan B., Emirler M.T. Disturbance observer based active independent front steering control for improving vehicle yaw stability and tire utilization // Int J Autom Technol. – 2022. – Vol. 23(3). – P. 841–854.
20. Multi-obstacle avoidance algorithm for autonomous vehicles / E. Nossier, F. Ibrahim, M. Abdelwahab, M. AbdelAziz // 16th International conference on computer engineering and systems (ICCES). – Egypt, 2021. – P. 1–6.

Информация об авторах

Александр Георгиевич Гарганеев, доктор технических наук, профессор отделения электроэнергетики и электротехники Инженерной школы энергетики Национального исследовательского Томского политехнического университета, Россия, 634050, г. Томск, пр. Ленина, 30. tpbalex13@tpu.ru

Ибрагим Ахмед Ибрагим, кандидат технических наук, старший научный сотрудник, научно-техническая группа центра разработки и перспективных решений, АО Муромский машиностроительный завод, Россия, 634055, г. Томск, Академический пр., 8/8. ibragim_a@mmz.group

Дмитрий Игоревич Ульянов, аспирант отделения электроэнергетики и электротехники Инженерной школы энергетики Национального исследовательского Томского политехнического университета, Россия, 634050, г. Томск, пр. Ленина, 30. diu3@tpu.ru

Антон Александрович Антропов, заместитель директора по инженерно-технической работе центра разработки и перспективных решений АО Муромский машиностроительный завод, Россия, 634055, г. Томск, Академический пр., 8/8. antropov_aa@mmz.group

Поступила в редакцию: 13.05.2024

Поступила после рецензирования: 13.06.2024

Принята к публикации: 09.09.2024

REFERENCES

1. Shi G., Zhao S., Min J. Simulation analysis for electric power steering control system based on permanent magnetism synchronization motor. *Proc. of the 2nd International Conference on Electronic and Mechanical Engineering and Information Technology*. France, 2012. pp. 1778–1783. DOI: 10.2991/emeit.2012.394.
2. Hiremath R.R., Isha T.B. Modelling and simulation of electric power steering system using permanent magnet synchronous motor. *IOP Conf. Ser. Mater. Sci. Eng.*, 2019, vol. 561, no. 1.
3. Arefiev V.A., Banov A.M., Bratchikov S.I., Boloyan N.A., Vershigora V.A., Kashkanov V.V., Mikheev Yu.V., Netesanov A.V., Salakhov M.Kh. Mathematical model of electric power steering. *Problems of development of the automotive industry in Russia. Dokl. Intl. scientific-practical conf.* Togliatti, October, 1998. pp. 123–129. (In Russ.).
4. Korolev V.V. *Electromechanical power steering system*. Cand. Diss. Togliatti, 2005. 188 p. (In Russ.).
5. Mohammed I.A., Hamza A. Electric power-assisted steering: a review. *2nd Int. Conf. IEEE Comput. Chapter*, Niger, October 2019. pp.501–507.
6. Lee J., Chang H.J., Ahn H.S. Explicit MPC for column-type EPS systems. *IET Electr. Power Appl.*, 2020, vol. 14, no. 1, pp. 91–100.
7. Ciarla V. Control of an Electronic Power Steering system for people with reduced mobility. *University of Grenoble*, 2014, vol. 14, no. 2, pp. 3–25.
8. Sorial R.R., Soliman M.H., Hasanien H.M., Talaat H.E.A. A vector controlled drive system for electrically power assisted steering using hall-effect sensors. *IEEE Access*, 2021, vol. 9, pp. 116485–116499.
9. Rodrigues M.R., Teixeira E.L.S., Santos M.M.D. Design of a parameterized model predictive control for electric power assisted steering. *Control Eng. Pract.*, 2019 July, vol. 90, pp. 331–341.
10. Du P.P., Su H., Tang G.Y. Active return-to-center control based on torque and angle sensors for electric power steering systems. *Sensors (Switzerland)*, 2018, vol. 18, no. 3, pp. 1–12.
11. Nemes R.O., Ruba M., Martis C. Integration of real-time electric power steering system Matlab/Simulink model into National Instruments VeriStand Environment. *Proc. IEEE 18th Int. Conf. Power Electron. Motion Control*. Romania, 2018. pp. 201–205.
12. Li Z., Wenjiang W. Study on stability of electric power steering system. *IEEE Int. Conf. Robot. Autom. Mechatronics*. China, 2008. No. Csic, pp. 368–372.
13. Xiaolin Zhang, Jiming Ma. Design and simulation of electric power steering system. *Computer Simulation*, March 2014, vol. 31, pp. 175–178.
14. Liang Xiong, Heping Liu, Donglin Peng. A control strategy for automotive electric power steering system without torque senso. *Automotive Engineering*, August 2013, vol. 35, pp. 711–715.
15. Toshihide Satake, Masahiko Kurishige, Noriyuki Inoue, Katsuya Ikemoto, Takayuki Kifuku, Kazumichi Tsutsumi. Evaluation of EPS Control Strategy Using Driving Simulator for EPS. *SAE Technical paper*. March 2003. DOI: 10.4271/2003-01-0582.
16. Zihui W., Zewei C. Zhiyuan H. Improved fast method of initial rotor position estimation for interior permanent magnet synchronous motor by symmetric pulse voltage injection. *IEEE Access*, 2020, vol. 8, pp. 59998–60007.
17. Chernyshev A.Yu., Dementyev Yu.N., Chernyshev I.A. *AC electric drive*. Moscow, Yurayt Publ., 2022. 214 p. (In Russ.).
18. Qiang Guo, Zhiping Dong, Heping Liu, Xiaoyao You. Nonlinear characteristics compensation of inverter for low-voltage delta-connected induction motor. *Energies*, 2020, vol. 13, no. 3, pp. 303–314.
19. Gözü M., Ozkan B., Emirler M.T. Disturbance observer based active independent front steering control for improving vehicle yaw stability and tire utilization. *Int J Autom Technol*, 2022, vol. 23 (3), pp. 841–854.
20. Nossier E., Ibrahim F., Abdelwahab M., AbdelAziz M. Multi-obstacle avoidance algorithm for autonomous vehicles. *16th International conference on computer engineering and systems (ICCES)*. Egypt, 2021. pp. 1–6.

Information about the authors

Alexandr G. Garganeev, Dr. Sc., Professor, National Research Tomsk Polytechnic University, 30, Lenin avenue, Tomsk, 634050, Russian Federation. tpbalex13@tpu.ru.

Ahmed Ibrahim, Cand. Sc., Senior Engineer, Research and Development center JSC Murom Machine-Building Plant, 8/8, Akademicheskoy avenue, Tomsk, 634055, Russian Federation. ibragim_a@mmz.group

Dmitry I. Ulyanov, Postgraduate Student, National Research Tomsk Polytechnic University, 30, Lenin avenue, Tomsk, 634050, Russian Federation. diu3@tpu.ru

Anton A. Antropov, Deputy Director for Engineering and Technical Work, Research and Development center JSC Murom Machine-Building Plant, 8/8, Akademicheskoy avenue, Tomsk, 634055, Russian Federation. antropov_aa@mmz.group

Received:13.05.2024

Revised: 13.06.2024

Accepted: 09.09.2024

УДК 504.06

DOI: 10.18799/24131830/2024/9/4465

Шифр специальностей ВАК: 1.6.6

Миграция химических элементов в подземных водах горнопромышленной территории

Л.С. Рыбникова✉, П.А. Рыбников, В.Ю. Наволокина

Институт горного дела УрО РАН, Россия, г. Екатеринбург

✉luserib@mail.ru

Аннотация. *Актуальность* исследования обусловлена необходимостью изучения форм миграции химических элементов в подземных водах затопленных медноколчеданных рудников для правильного понимания и прогнозирования процессов их переноса и распределения в гидрогеохимических полях. Подземные и поверхностные воды являются сложной смесью веществ, в которой в зависимости от pH, Eh и t °C формируются фазовые переходы с последующим растворением или осаждением минералов. Для решения этих задач используется численное гидрогеомиграционное моделирование, в том числе физико-химическое, которое позволяет сделать выводы о масштабах загрязнения и местах локализации таких участков для последующих разработок мероприятий по улучшению состояния гидросферы. **Цель:** определение форм миграции химических элементов в подземных водах и расчет индексов насыщения воды по отношению к минералам. **Объекты:** подземные воды на территории закрытого Левихинского медноколчеданного рудника. **Методы:** лабораторные исследования подземных вод выполнялись с использованием методов пламенно-эмиссионной спектрометрии, пламенно атомно-абсорбционной, фотометрическим методом с реактивом Несслера, титриметрическим, меркуметрическим и потенциометрическим методами; масс-спектрометрией с ионизацией в индуктивно связанной плазме и гравиметрическим методом. Для физико-химического моделирования использовался программный продукт Visual MINTEQ 3.1. **Результат.** По результатам обработки химических анализов и физико-химического моделирования все опробованные скважины поделены на группы. Первая группа – скважины № 1, 2, 3 и 6, расположенные в пределах бывшего горного отвала (возле ш. «Левиха XIV», техногенного водоема, ш. «Левиха II» и станции нейтрализации). Вторая группа представлена водой в скважинах № 4 возле ствола ш. «Центральная» и № 5 возле отвала «Южный». Третья группа – скважина № 7, расположенная возле устья р. Левихи. Индексы насыщения и формы миграции компонентов в водной среде позволяют выявить масштаб загрязнения и места локализации таких участков. Установлено, что при действующей системе сбора и очистки не происходит масштабного загрязнения подземных вод на Левихинском руднике. Оно локализуется в районе шахтного ствола «Центральный» (скважина № 4) и отвала «Южный» (скважина № 5).

Ключевые слова: гидросфера, миграция, загрязняющие вещества, подземные воды, Visual MINTEQ 3.1

Благодарности: Работа выполнена при поддержке Государственного задания ИГД УрО РАН № 075-00412-22 ПР. Тема 2 (2022–2024 гг.) «Разработка геоинформационных технологий оценки защищенности горнопромышленных территорий и прогноза развития негативных процессов в недропользовании» (FUWE-2022-0002) г. р. № 1021062010532-7-1.5.1.

Для цитирования: Рыбникова Л.С., Рыбников П.А., Наволокина В.Ю. Миграция химических элементов в подземных водах горнопромышленной территории // Известия Томского политехнического университета. Инжиниринг георесурсов. – 2024. – Т. 335. – № 9. – С. 137–147. DOI: 10.18799/24131830/2024/9/4465

UDC 504.06

DOI: 10.18799/24131830/2024/9/4465

Chemical elements migration in ground waters of mining territory

L.S. Rybnikova✉, P.A. Rybnikov, V.Yu. Navolokina

Institute of Mining of the Ural Branch of the Russian Academy of Sciences, Ekaterinburg, Russian Federation

✉luserib@mail.ru

Abstract. Relevance. The need to study the forms of migration of chemical elements in the groundwater of flooded copper pyrite mines in order to correctly understand and predict their transfer and distribution in hydrogeochemical fields. Ground and surface waters are a complex mixture of substances in which, depending on pH, Eh and $t^{\circ}\text{C}$, phase transitions are formed with subsequent dissolution or precipitation of minerals. To solve these problems, numerical hydrogeomigration modeling is used, including physicochemical, which allows drawing conclusions about the scale of pollution and the localization of such areas for subsequent development of measures to improve the state of the hydrosphere. **Aim.** To determine the forms of metal migration in groundwater and to calculate water saturation indices in relation to minerals. **Objects.** Groundwater in the territory of the closed Levikha copper pyrite mine. **Methods.** Laboratory studies of groundwater were carried out using flame emission spectrometry, flame atomic absorption, photometric method with Nessler's reagent, titrimetric, mercurimetric and potentiometric methods; mass spectrometry with ionization in inductively coupled plasma and gravimetric method. Physical and chemical modeling using the software product Visual MINTEQ 3.1. **Results.** According to the results of processing chemical analyzes and physical and chemical modeling, all tested wells are divided into groups: 1) wells no. 1, 2, 3 and 6, located within the former mining allotment (near the Levikha XIV mine, a man-made reservoir, the Levikha II mine and a neutralization station); 2) represented by water in wells no. 4 near the shaft of the mine Tsentralnaya and no. 5 near the dump Yuzhny; 3) well no. 7, located near the mouth of the Levikha river. Saturation indices and forms of migration of components in the aquatic environment make it possible to identify the scale of pollution and the localization of such areas. Thus, with the current pumping system, there is no large-scale pollution of groundwater at the Levikha mine. It is localized in the area of the Tsentralny mine shaft (well no. 4) and the Yuzhny dump (well no. 5).

Keywords: hydrosphere, migration, pollutants, groundwater, Visual MINTEQ 3.1

Acknowledgements: This work was supported by the State Assignment No. 075-00412-22 PR of the Institute of Mining, Ural Branch, Russian Academy of Sciences. Topic 2 (2022–2024) "Development of geoinformation technologies for assessing the protection of mining areas and forecasting the development of negative processes in subsoil use" (FUWE-2022-0002) No. 1021062010532-7-1.5.1.

For citation: Rybnikova L.S., Rybnikov P.A., Navolokina V.Yu. Chemical elements migration in ground waters of mining territory. *Bulletin of the Tomsk Polytechnic University. Geo Assets Engineering*, 2024, vol. 335, no. 9, pp. 137–147. DOI: 10.18799/24131830/2024/9/4465

Введение

Химический состав подземных вод зависит от ряда факторов, таких как: природные условия территории; особенности питания и разгрузки; состав и фильтрационные свойства водовмещающих пород [1–3]. Состав подземных вод формируется в результате взаимодействия породы с водой, твердые фазы (неорганические и органические вещества) являются как источниками, так и поглотителями растворенных компонентов подземных вод [4].

Изучение форм химических элементов в подземных водах разного состава позволяет правильно прогнозировать процессы их переноса и распределения в гидрогеохимических полях. Такой аспект важен при исследовании потоков рассеяния и оценки техногенного воздействия их на гидросферу [5]. Так, при решении вопросов охраны водных объектов немаловажное значение имеет то обстоятельство, что разные миграционные формы одного и того же элемента имеют различную токсичность. Например, катионные формы меди (Cu^{2+} , CuOH^{+} , $\text{Cu}_2(\text{OH})_2^{2+}$) существенно опаснее ее нейтральных или анионных форм [6]. Также при определении химических элементов в воде необходимо учитывать, что многие методы аналитического определения (особенно колориметрического) разработаны только на их определенные химические состояния, поэтому существуют противоречия между формами определения элементов при химическом анализе подземных вод и их реальным состоянием. Вследствие этого в водах могут обнаруживаться не

все элементы что приводит к недостоверности полученных данных. В связи с этим необходимо знать и прогнозировать вероятные состояния элементов в подземных водах [7, 8].

Таким образом, целью работы является определение форм миграции металлов в подземных водах затопленного Левихинского рудника и расчет индексов насыщения воды по отношению к минералам.

Объект исследования

Левихинская группа медноколчеданных месторождений расположена в Свердловской области, в 30 км северо-западнее г. Кировград, на восточной окраине поселка Левиха (рис. 1).

Месторождения открыты в 20-х гг. прошлого века. Эксплуатация проводилась как открытым, так и подземным способом. С 2003 г. началось затопление горных выработок [9]. К 2007 г. на северном фланге рудника в провале глубиной около 20 м (в наиболее низкой точке горного отвода) сформировался техногенный водоем, куда разгружаются минерализованные кислые шахтные воды (КШВ) с расходом порядка $120 \text{ м}^3/\text{ч}$ [10].

Начиная с 2007 г. для предотвращения загрязнения окружающей среды после затопления рудника была организована система сбора КШВ, перекачки из техногенного водоема, их нейтрализация известковым молоком, сброс в пруд-осветлитель. Далее вода самотеком по старому руслу р. Левихи попадает в р. Тагил [10].

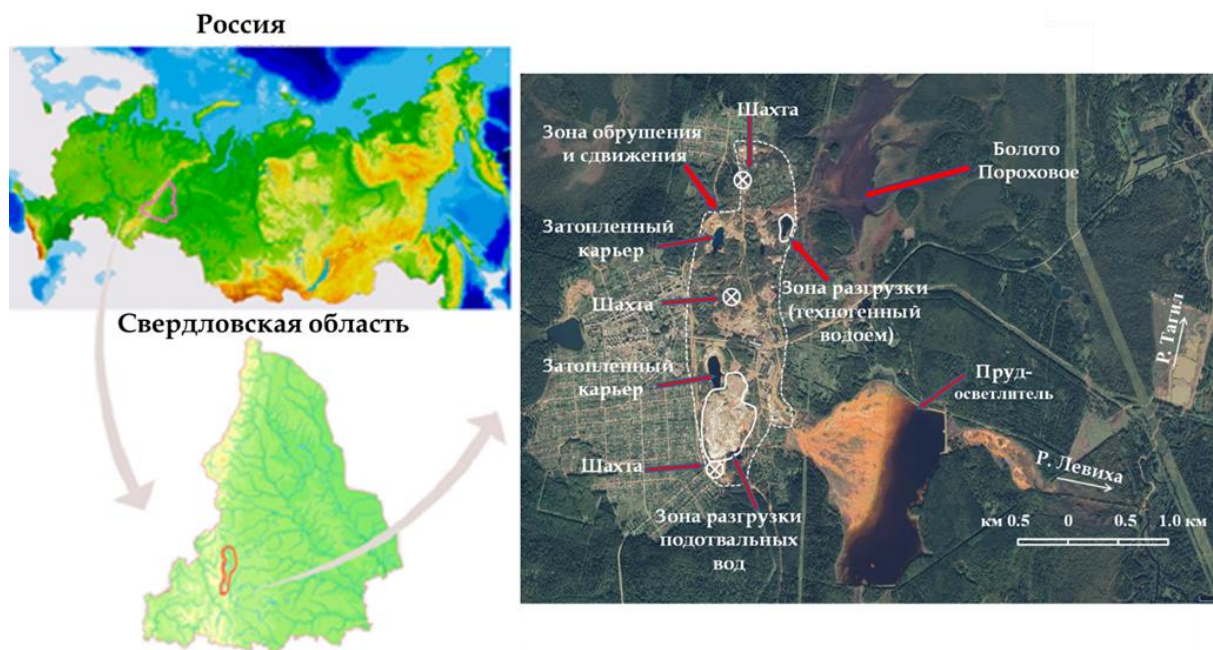


Рис. 1. Обзорная схема расположения объектов на Левихинском руднике
Fig. 1. Overview layout of objects at the Levikha mine

В 2003 г. водоотлив был остановлен, депрессионная воронка заполнилась, и к 2007 г. в самой низкой точке горного отвода в провале сформировался техногенный водоем, в который происходит разгрузка кислых ($\text{pH}=2,7\text{--}4,1$) минерализованных (до 12 г/л) шахтных вод сульфатного состава с высоким содержанием Fe, Al, Mg, Zn, Cu, Mn. Расход такой разгрузки порядка $120 \text{ м}^3/\text{ч}$ – в 2 раза меньше, чем был водоотлив в период отработки.

Начиная с 2007 г. нейтрализация КШВ возобновилась: из техногенного водоема шахтные воды перекачиваются на станцию нейтрализации и очищенные сточные воды поступают в пруд-осветлитель. Сброс их происходит в р. Левиху, левый приток р. Тагил (Иртышский бассейновый округ).

Методы исследования

Для характеристики состава подземных вод в районе Левихинского медноколчеданного рудника в мае 2021 г. были пробурены наблюдательные скважины глубиной от 30 до 50 м, расположенные в пределах бывшего горного отвода (6 скважин) и ниже сброса с пруда-осветлителя в устье р. Левихи (1 скважина) (рис. 2).

Химический состав подземной воды на расширенный перечень компонентов исследовался по результатам посезонного четырехкратного опробования в течение 2021 г. Анализы проводились в сертифицированной лаборатории в химико-аналитическом центре Института промышленной экологии УрО РАН (г. Екатеринбург) с использованием методов пламенно-эмиссионной спектро-

метрии, пламенно атомно-абсорбционной, масс-спектрометрией с ионизацией в индуктивно связанной плазме. В каждой пробе определено порядка 26 компонентов. На месте измеряли температуру (t , °C), окислительно-восстановительный потенциал (Eh, mV), водородный показатель (pH, ед.), общее количество растворенных в воде частиц (TDS, ppm), электропроводность (EC, mS).

Определение миграционных форм компонентов и процессов формирования состава подземных вод проводилось методом численных расчётов с использованием программы равновесного физико-химического моделирования геохимических процессов в системе «вода–порода» Visual MINTEQ 3.1 [11–15].

Для каждого минерала рассчитывается индекс насыщения SI (saturation indices), который определяется как разница между $\log \text{IAP}$ (ion activity product, произведение ионной активности продуктов реакции) и $\log K_s$ (константа растворимости минерала, включенная в термодинамическую базу данных):

$$SI = \log \text{IAP} - \log K_s.$$

Индекс насыщения SI представляет информацию о состоянии раствора относительно твердой фазы. При $SI < 0$ раствор является ненасыщенным; при $SI = 0$ раствор находится в равновесии с твердой фазой; при $SI > 0$ раствор пересыщен. Если раствор ненасыщен, прогнозируется растворение соответствующей твердой фазы. При условии, что раствор пересыщен, наиболее вероятной будет реакция осаждения растворенных веществ из раствора [6, 16].

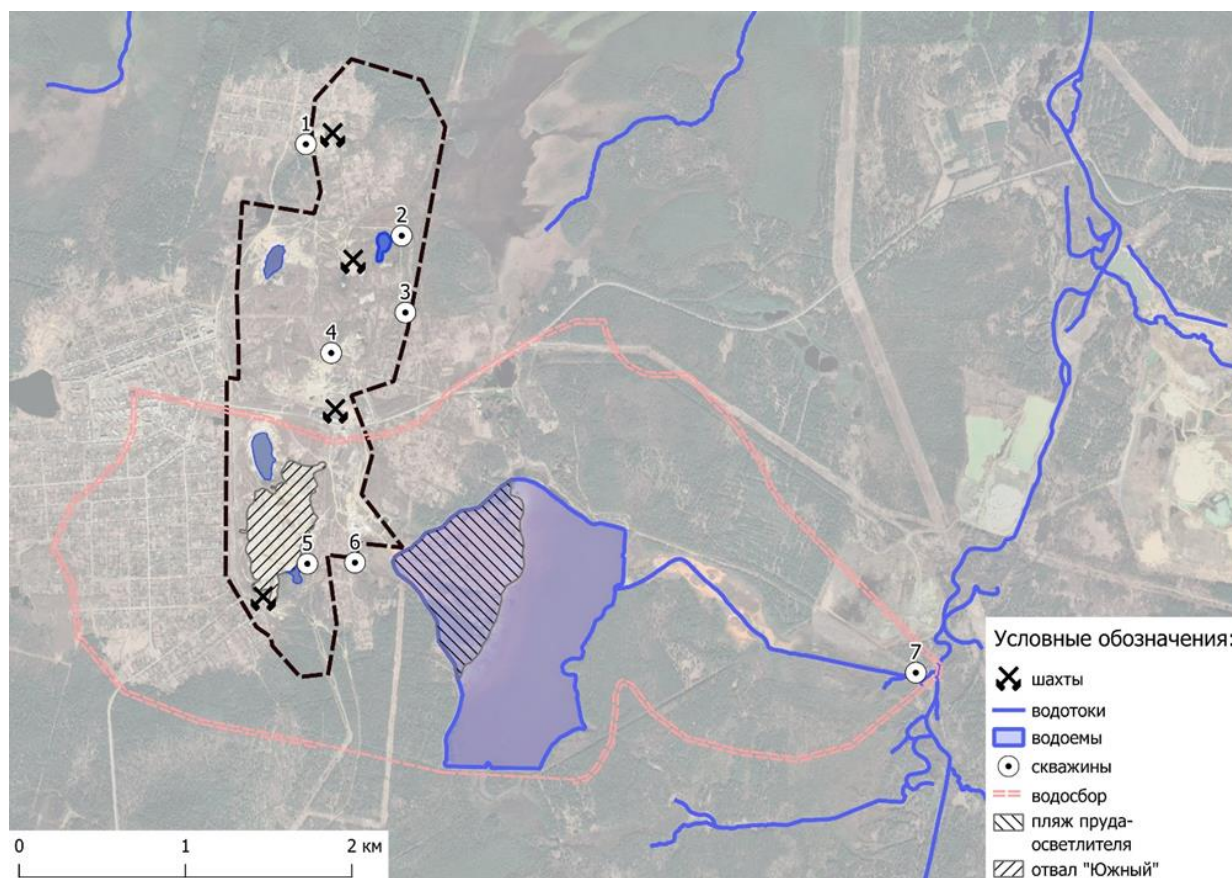


Рис. 2. Схема расположения скважин: 1 – возле ш. «Левиха XIV»; 2 – возле техногенного водоема; 3 – возле ш. «Левиха II»; 4 – возле ствола ш. «Центральная»; 5 – возле отвала «Южный»; 6 – возле станции нейтрализации; 7 – ниже сброса с пруда-осветлителя, в устье р. Левихи

Fig. 2. Well location diagram: 1 – near the mine Levikha XIV; 2 – near the collapse zone; 3 – near the mine Levikha II; 4 – near the shaft of the Tsentralnaya mine; 5 – near the Yuzhny dump; 6 – near the neutralization (treatment) station; 7 – below the discharge from the clarification pond, at the mouth of the river Levikha

Результаты и обсуждение

Гидрохимическая характеристика подземных вод

Минерализация в подземных водах варьирует от 0,2 до 2,0 г/л (табл. 1). Исключение составляют скважины № 4 возле ствола ш. «Центральная» (минерализация до 13,7 г/л) и № 5 возле отвала «Южный» (минерализация до 35,3 г/л). На высокую минерализацию и ее изменчивость в скважине № 5 влияют кислые подотвальные воды, текущие с отвала «Южный». В свою очередь химический состав подотвальной воды сильно зависит от сезона и осадков за предшествующие дни [17].

Анионный состав подземной воды сульфатный, катионный состав магниевый-кальциевый либо железо-алюминиевый. Исключение составляют скважины № 1, 3, 7. В скважинах № 1, 3 вода имеет гидрокарбонатно-хлоридно-сульфатный состав; по катионам вода натриево-кальциево-магниевая и магниевый-кальциевая. В скважине № 7 вода имеет гидрокарбонатно-сульфатный состав; по катионам вода магниевый-кальциевая. В скважинах № 1, 2, 3, 6 воды слабокислые (pH от 5,0 до 6,4). В скважинах № 4 и 5 воды

кислые (pH от 2,8 до 3,5). Фактические величины pH имеют нейтральные значения в скважине № 7 (до 7,0). Воды в скважинах № 2, 4, 5 находятся в окислительной обстановке (значения $E_h > +100$ мВ), в воде присутствует свободный кислород, элементы мигрируют в высшей форме своей валентности. Воды в остальных скважинах находятся в условиях переходной окислительно-восстановительной обстановки: величины E_h изменяются от 0 до +100 мВ, в условиях неустойчивого геохимического режима, когда протекает как слабое окисление, так и слабое восстановление целого ряда металлов (табл. 1, рис. 2, 3).

Содержания металлов в подземных водах превышают кларки концентраций (КК) [18] на один-пять порядков (рис. 4). Самые существенные превышения КК (в тысячи раз) отмечаются в скважинах № 4 и 5 для Al, As, Be, Cd, Cu, Co, Fe, Mg, Mn, Ni, Zn. В скважине № 2 значения КК снижаются на один-два порядка. В скважинах № 1 и 6 превышения кларков (сотни-десятки раз) обнаружены для Cd, Cu, Co, Mn, Ni и Zn. В скважине № 7 отмечаются превышения по Be, Ca, Co, Mg, Mn и Ni (рис. 4).

Таблица 1. Состав воды в скважинах (даты опробования 26.05.2021–24.09.2021)

Table 1. Composition of water in wells (sampling dates 26.05.2021–24.09.2021)

№ скважин Well no.	Состав воды (формула Курлова) Water composition (Kurlov formula)	Минерализация, г/л Mineralization, g/L	pH	Eh, mV	t, °C
1	$\frac{\text{SO}_4 72 \text{ Cl } 21}{\text{Mg } 48 \text{ Ca } 34 \text{ Na } 13}$	0,1–0,2	5,1–5,4	98–103	8,0–9,3
2	$\frac{\text{SO}_4 94}{\text{Ca } 55 \text{ Mg } 27}$	0,5	5,0–5,1	111–124	7,7–9,0
3	$\frac{\text{SO}_4 65 \text{ Cl } 23 \text{ HCO}_3 12}{\text{Ca } 68 \text{ Mg } 23}$	0,5	6,2–6,4	48–58	8,0
4	$\frac{\text{SO}_4 99}{\text{Al } 44 \text{ Mg } 21 \text{ Fe}^{2+} 17}$	10,7–13,7	2,9–3,5	206–210	9,0–11,2
5	$\frac{\text{SO}_4 99}{\text{Al } 43 \text{ Fe}^{2+} 26 \text{ Mg } 20}$	12,9–35,3	2,8–3,2	233–237	9,0–12,0
6	$\frac{\text{SO}_4 93}{\text{Ca } 73 \text{ Mg } 19}$	1,9–2,0	6,1–6,2	58–64	7,4–8,4
7	$\frac{\text{SO}_4 65 \text{ HCO}_3 33}{\text{Ca } 71 \text{ Mg } 24}$	0,8–0,9	6,7–7,0	18–30	9,1–8,5

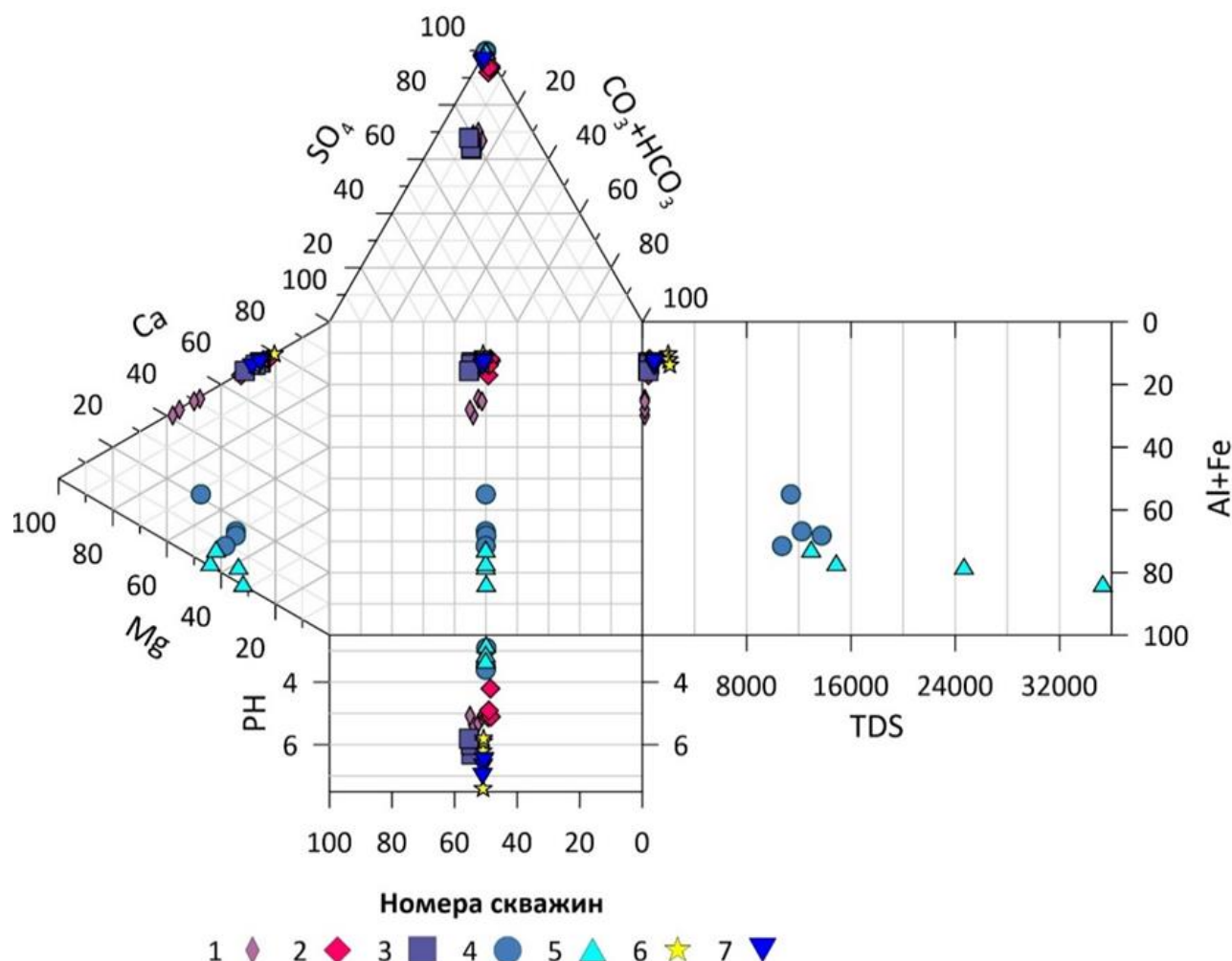


Рис. 3. Диаграмма Дурова (%-экв/л)

Fig. 3. Durov diagram (%-eq/L).

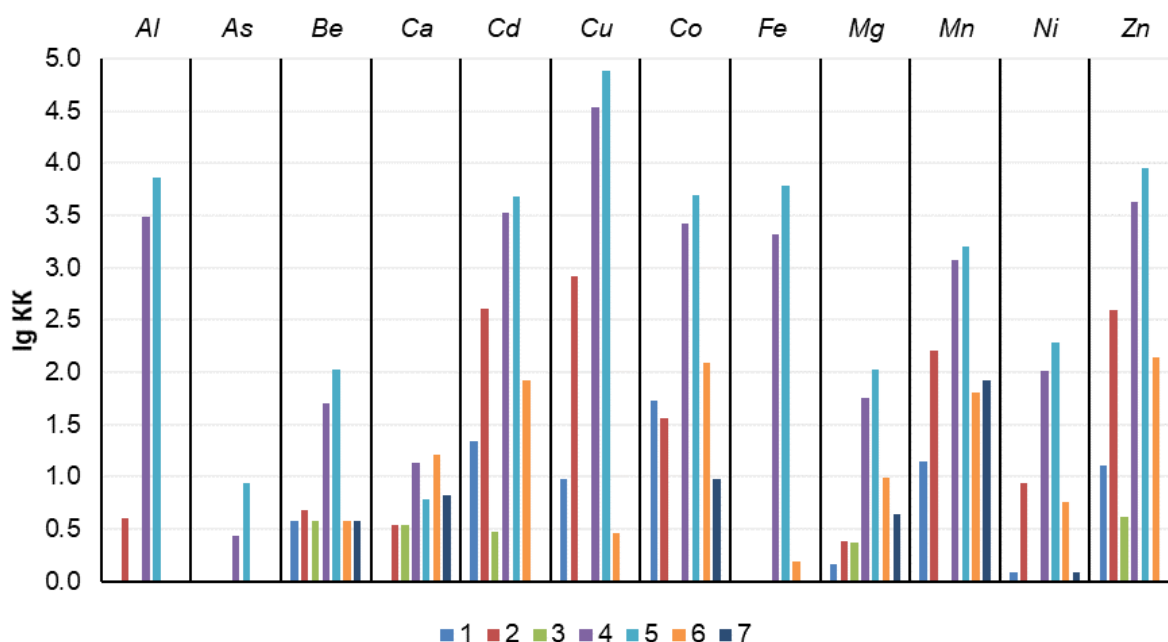


Рис. 4. Геохимический спектр элементов в воде опробованных скважин (lg CC)

Fig. 4. Geochemical spectrum of elements in the water of tested wells (lg CC)

Формы миграции элементов и результаты расчетов индексов насыщений

Основные химические формы миграции элементов в подземных водах зависят от их валентности. Так, по данным термодинамических расчетов, однозарядные катионы (натрий и калий) мигрируют преимущественно в виде свободных ионов (в среднем более 95 %) (рис. 5). Двухзарядные катионы (кальций, магний, марганец, цинк) мигрируют в ионно-растворенной форме (более 55 %), реже в форме сульфатных комплексов.

Fe является переходным элементом и, в зависимости от окислительно-восстановительного потенциала, имеет степень окисления 2+ или 3+ [18–20]. Так, Fe^{2+} находится либо в свободной форме (от 51 до 91 %), либо в комплексе с сульфатами FeSO_4^+ (до 56 %). Форма миграции Fe^{3+} определяется кислотностью среды: в слабокислой и нейтральной среде это гидроксидные комплексы (FeOH_2^+ , $\text{Fe}(\text{OH})_2^+$), в кислой среде это сульфатные комплексы (FeSO_4^+ , FeSO_4^{2-}).

Al может формировать наибольшее количество разнообразных комплексов, исключение составляют скважины № 4, 5 с кислой водой, в них формы миграции преимущественно в сульфатной группе (рис. 5).

Термодинамические расчеты показали, что подземные воды перенасыщены по отношению к различным гидроксидам и сульфатам алюминия, оксид-гидроксидам и оксидам железа, а также к карбонатам (табл. 2).

Во всех скважинах воды насыщены по отношению к минералам группы сульфатов. Вода в сква-

жинах № 1, 2, 3, 5, 6 (нейтральная вода) перенасыщена по $\text{Al}_4(\text{OH})_{10}\text{SO}_4(\text{s})$ и алуниту. Вода в скважинах № 4, 5 (кислые воды) перенасыщена по отношению к ярозиту (табл. 2).

По отношению к минералам группы оксидов воды насыщены в скважинах № 3, 4, 5, 6 и 7. Вода в скважинах № 3, 6, 7 перенасыщена по герцититу. В скважинах № 4, 5 воды перенасыщены по отношению к гематиту и магнетиту (табл. 2), также кислые воды и вода в скважине № 7 перенасыщены по ферриту меди.

Воды практически по всем скважинам показывают насыщение по отношению к минералам группы оксид-гидроксидов. В нейтральных водах отмечается перенасыщение по диаспору (до 3,4). В скважине № 7 перенасыщение также заметно по бемиту (до 1,6). В кислых подземных водах отмечается перенасыщение (до 3,4) по гетиту и (до 3,1) лепидокрокиту ($\gamma\text{-FeO}(\text{OH})$) (табл. 2).

Индексы насыщения вод по гидроксиду алюминия и гиббситу (гидраргиллиту) находятся в диапазоне от 0,4 до 2,5 (табл. 2).

Индексы насыщения воды по отношению к минералам группы карбонатов самые низкие: в скважине № 7 индекс насыщения по карбонату марганца 0,1 и по родохзиту 0,6 (табл. 2).

По отношению к минералам группы галогенидов воды насыщены в скважинах № 3, 4, 5, 6 и 7. Наиболее высокая степень перенасыщения отмечается по $\text{Fe}(\text{OH})_2\text{Cl}_3(\text{s})$ в скважинах № 4 и 5, для которых индексы насыщения достигают 5,4 и 4,9, соответственно (табл. 2).

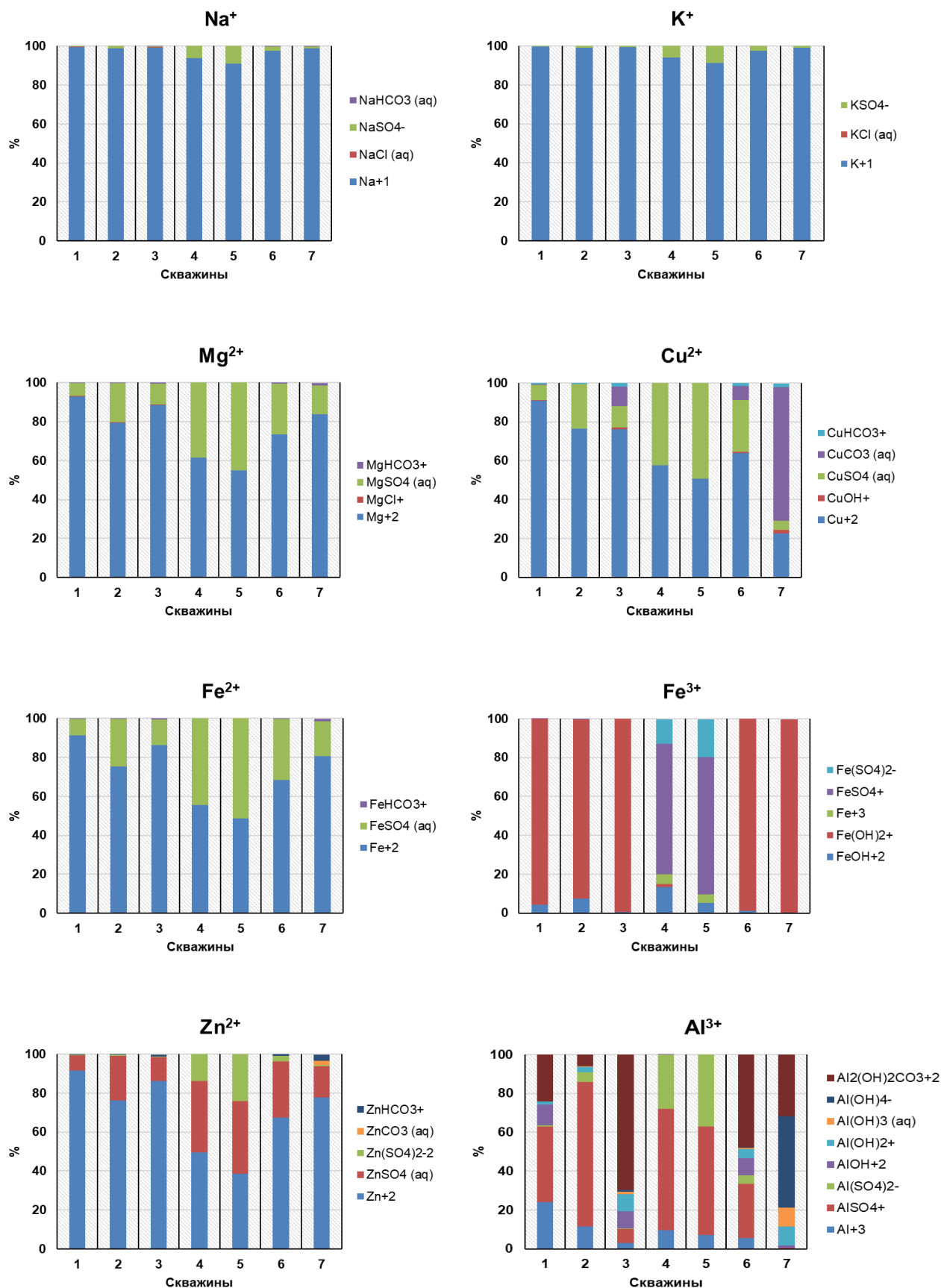


Рис. 5. Формы миграции элементов
Fig. 5. Forms of element migration

Таблица 2. Результаты расчета индексов насыщения подземных вод

Table 2. Results of calculation of groundwater saturation indices

Минерал Mineral	Формула Formula	Группа Group	Номера скважин/Well numbers						
			1	2	3	4	5	6	7
Al(OH) ₃ (Осадок) Al(OH) ₃ (Soil)	Al(OH) ₃	гидроксиды hydroxide	0,4	–	1,2	–	–	0,7	1,9
Гиббсит (C) Gibbsite (C)	γ-Al(OH) ₃		0,9	0,5	1,8	–	–	1,3	2,5
Al ₄ (OH) ₁₀ SO ₄ (s)	Al ₄ (OH) ₁₀ SO ₄	сульфаты sulfates	2,6	2,1	4,5	–	–	3,6	5,7
AlOHSO ₄ (s)	AlOHSO ₄		–0,8	–0,2	–	0,9	0,9	–	–
Алунит Alunite	KAl ₃ (OH) ₆ (SO ₄) ₂		1,9	2,3	2,1	0,5	–	2,4	2,3
Ярозит K-Jarosite	KFe ³⁺ ₃ (OH) ₆ (SO ₄) ₂		–	–	–	5,8	4,6	–	–
Бёмит Boehmite	γ-AlO(OH)	оксид-гидроксиды oxide-hydroxides	0,0	–0,5	0,8	–	–	0,3	1,6
Диаспор Diaspore	AlO(OH)		1,8	1,4	2,7	–	–	2,2	3,4
Ферригидрит Ferrihydrite	(Fe ³⁺) ₂ O ₃ ·0,5H ₂ O		–	–	–	0,3	–0,3	–	–
Гетит Goethite	FeO(OH)		–	–	–0,8	3,4	2,8	–0,3	1,2
Лепидокрокит Lepidocrocite	γ-FeO(OH)		–	–	–1,0	3,1	2,6	–0,5	0,9
Гематит Hematite	Fe ₂ O ₃	оксиды oxides	–	–	0,8	9,1	7,9	1,8	4,7
Герценит Hercynite	FeAl ₂ O ₄		–	–	1,8	–	–	1,3	5,0
Магнетит Magnetite	Fe ₃ O ₄		–	–	1,9	7,6	6,2	3,3	7,6
Феррит меди Cupric Ferrite	CuFe ₂ O ₄		–	–	–	4,1	2,7	–	2,8
Маггемит Maghemite	γ-Fe ₂ O ₃		–	–	–	2,6	1,5	–	–
MnCO ₃ (am)	MnCO ₃	карбонаты carbonates	–	–	–	–	–	–	0,1
Родохрозит Rhodochrosite	MnCO ₃		–	–	–	–	–	–0,9	0,6
Fe(OH) _{2,7} Cl ₃ (s)	Fe(OH) _{2,7} Cl ₃	галогениды halides	–0,5	–	0,7	5,4	4,9	1,1	2,1

Примечание: «–» индекс насыщения меньше –1/Note: «–» saturation index is less than –1.

Вода в скважинах № 1, 2, 3 и 6 характеризуются идентичными индексами насыщения по минералам групп сульфаты, гидроксиды и карбонаты. Они пересыщены по отношению к Al₄(OH)₁₀SO₄(s) (от 2,1 до 4,5), алуниту (от 1,9 до 2,4), диаспору (от 1,4 до 2,7) и гиббситу (от 0,5 до 1,8). Вторая группа – это вода в скважинах № 4 и 5, здесь отмечается пересыщение по отношению к минералам групп оксиды, сульфаты, оксид-гидроксиды и галогениды: гематиту (9,1–7,9), магнетиту (7,6–6,2), ярозиту (5,8–4,6), гетиту (3,4–2,8) и лепидокрокиту (3,1–2,6). В третьей группе (скважина № 7) наблюдается небольшое перенасыщение по минералам карбонатной группы (MnCO₃(am) и родохрозиту), а также по Al₄(OH)₁₀SO₄(s) (5,7), гиббситу (2,5) и диаспору (3,4) (табл. 2).

Таким образом, по результатам обработки химических анализов и физико-химического моделирования все опробованные скважины можно разделить на три группы. Первая – скважины № 1, 2, 3 и 6, расположенные в пределах бывшего горного от-

вода (возле ш. «Левиха XIV», техногенного водоема, ш. «Левиха II» и станции нейтрализации) мало- и слабоминерализованные (до 2 г/л) сульфатные магниевые-кальциевые и кальциевые-магнелиевые воды. Фактические величины pH в воде скважин № 1, 2, 3, 6 имеют умереннокислые и слабокислые значения, варьируют от 5,1 (скважина № 2) до 6,2 (скважина № 3), а также характеризуются идентичными индексами насыщения по минералам групп сульфаты, гидроксиды и карбонаты. Они пересыщены по отношению к Al₄(OH)₁₀SO₄(s), алуниту, диаспору и гиббситу. Вторая группа представлена водой в скважинах № 4 возле ствола ш. «Центральная» (минерализация 12,2 г/л) и № 5 возле отвала «Южный» (минерализация 24,7 г/л), вскрывшиеся кислые сульфатные магниевые-алюминиевые либо железно-алюминиевые воды. Они пересыщены по отношению к минералам групп оксиды, сульфаты, оксид-гидроксиды и галогениды: гематиту, магнетиту, ярозиту, гетиту и лепидокрокиту.

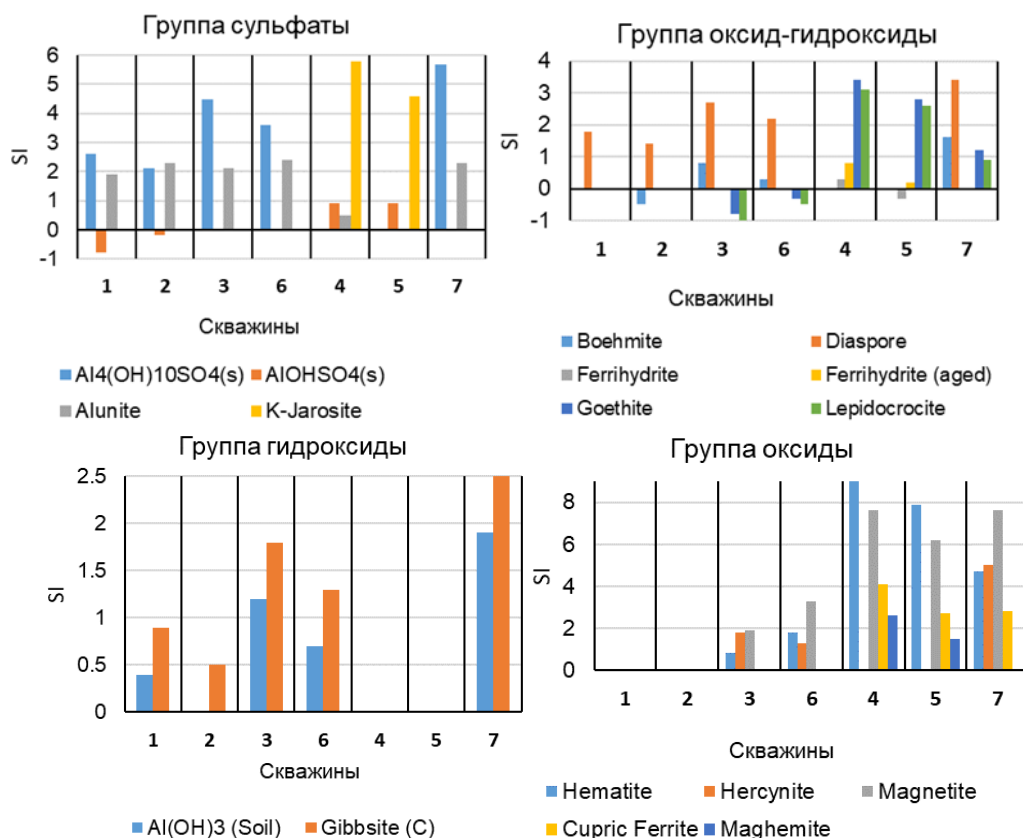


Рис. 6. Индексы насыщения воды по отношению к минералам

Fig. 6. Water saturation indexes with respect to minerals

Третья группа – это вода скважины № 7 с нейтральной средой, расположенная возле устья р. Левихи, слабominерализованная (до 0,9 г/л) гидрокарбонатно-сульфатная магниевая-кальциевая. В воде наблюдается небольшое перенасыщение по минералам карбонатной группы ($MnCO_3(am)$ и родохрозиту), а также по $Al_4(OH)_{10}SO_4(s)$, гиббситу и диаспору (рис. 6).

Выводы

Подземные воды Левихинского рудника относятся в основном к сульфатным магниевая-кальциевым или железо-алюминиевым водам. Несмотря на нейтральные и слабокислые значения pH в опробованных скважинах, содержание тяжелых металлов в них достигает высоких значений, превышающих кларки концентраций на один–пять порядков. Тем не менее для токсичности зако-

плексованность элементов в воде является важнее, чем общая концентрация. Металлы весьма токсичны в форме свободных ионов, но менее токсичны при тех же концентрациях, когда они представлены в виде комплексов.

Расчеты индексов насыщения относительно минералов выявили, что подземные воды перенасыщены по отношению к алуниту и $Al_4(OH)_{10}SO_4$. Кислые воды, в отличие от нейтральных и слабокислых, имеют высокие SI по ярозиту, гетиту, ферриту меди (II) и маггемиту.

Полученные результаты обработки химических анализов и моделирования позволили разделить опробованные скважины на группы и выявить масштаб загрязнения и места локализации таких участков на территории Левихинского медноколчеданного рудника.

СПИСОК ЛИТЕРАТУРЫ

1. Favas P.J.C., Pratas J., Gomes M.E.P. Hydrochemistry of superficial waters in the Adoria mine area (Northern Portugal): environmental implications // *Environmental Earth Sciences*. – 2012. – Vol. 65. – P. 363–372.
2. Geochemistry of trace metals and rare earth elements in stream water, stream sediments and acid mine drainage from Darrehzar Copper Mine, Kerman, Iran / N. Soltani, F. Moore, B. Keshavarzi, R. Sharifi // *Water Quality, Exposure and Health*. – 2014. – Vol. 6. – № 3. – P. 97–114.
3. Корнеева Т.В., Юркевич Н.В., Аминов П.Г. Геохимические особенности миграционных потоков в зоне влияния горнопромышленного техногенеза (г. Медногорск) // *Известия Томского политехнического университета. Инжиниринг георесурсов*. – 2017. – Т. 328. – № 2. – С. 85–94.

4. Nordstrom D.K. Hydrogeochemical processes governing the origin, transport and fate of major and trace elements from mine wastes and mineralized rock to surface waters // *Applied Geochemistry*. – 2011. – Vol. 26. – P. 1777–1791.
5. Корнеева Т.В., Юркевич Н.В., Саева О.П. Геохимическое моделирование поведения тяжелых металлов в техногенных системах // *Известия Томского политехнического университета. Инжиниринг георесурсов*. – 2018. – Т. 329. – № 3. – С. 89–101.
6. Воробьева Д.А., Евтюгина З.А. Формы миграции никеля и меди в ультрапресных водах центральной части Кольского региона // *Вестник Забайкальского государственного университета*. – 2021. – Т. 27. – № 5. – С. 6–16.
7. Крайнов С.Р., Рыженко Б.Н., Швеи В.М. Геохимия подземных вод. Теоретические, прикладные и экологические аспекты. – М.: Изд-во «Наука», 2004. – 672 с.
8. Формы миграции химических элементов в подземных водах горизонта / Д.А. Новиков, А.Е. Шохин, А.В. Черных, Ф.Ф. Дульцев // *Труды Ферсмановской научной сессии ГИ КНИЦ РАН*. – 2019. – Т. 16. – С. 448–453.
9. Рыбникова Л.С., Рыбников П.А., Наволокина В.Ю. Реабилитация техногенных объектов отработанных медноколчеданных месторождений на примере Левихинского рудника (Средний Урал) // *Известия Томского политехнического университета. Инжиниринг георесурсов*. – 2023. – Т. 334. – № 8. – С. 137–150.
10. Rybnikova L.S., Rybnikov P.A., Navolokina V.Y. Reducing negative impacts of dormant pyrite copper ore mine on the geosphere in the Urals // *Journal of Mining Science*. – 2022. – Vol. 58. – P. 519–525.
11. Gustafsson J.P. Visual MINTEQ. – 2013. URL: <https://vminteq.lwr.kth.se> (дата обращения 15.06.2023).
12. Impact of acid mine drainages on surficial waters of an abandoned mining site / M.L. Garcia-Lorenzo, J. Marimon, M.C. Navarro-Hervas, C. Perez-Sirvent, M.J. Martinez-Sanchez, J. Molina-Ruiz // *Environmental Science and Pollution Research*. – 2016. – Vol. 23. – P. 6014–6023.
13. Butler B.A., Ranville J.F., Ross P.E. Observed and modeled seasonal trends in dissolved and particulate Cu, Fe, Mn, and Zn in a mining-impacted stream // *Water Res.* – 2008. – Vol. 42. – P. 3135–3145.
14. Reactive solute transport in streams: a surface complexation approach for trace metal sorption / R.L. Runkel, B.A. Kimball, D.M. McKnight, K.E. Bencala // *Water Resour. Res.* – 1999. – Vol. 35 (12). – P. 3829–3840.
15. Assessment of metals loading in an acid mine drainage watershed / P. Gijung, J. Minjae, K. Hwansuk, J.B.M. Kristine, C. Gunhui, K. Sungpyo, K. Young, O. Seongwook, Y. Jaeyoung // *Mine Water Environmental*. – 2016. – Vol. 35. – P. 44–54.
16. Alhamed M. Application of geochemical modelling to investigate the geochemical behaviors of iron in a highly complex abandoned coal mine field // *Conference: Vietnam International Water Week-VACI 2018. – Vietnam, 2018. – 1 p.*
17. Rybnikova L.S., Rybnikov P.A., Galin A.N. Formation of under spoil water composition at copper-pyrite deposit in the middle Urals // *Journal of Mining Science*. – 2023. – Vol. 59. – P. 331–341.
18. Шварцев С.Л. Гидрогеохимия зоны гипергенеза. исправл. и доп. – М.: Недра, 1998. – № 2. – 366 с.
19. Малова А.И., Сидкина Е.С., Рыженко Б.Н. Модель месторождения алмазов им. М.В. Ломоносова как системы «вода–порода»: формы миграции, насыщенность подземных вод относительно породообразующих и рудных минералов, экологическая оценка качества вод // *Геохимия*. – 2017. – № 12. – С. 1128–1140.
20. Физико-химические аспекты миграционных процессов тяжелых металлов в природных водных системах / О.А. Давыдова, Е.В. Коровина, Е.С. Ваганова, И.Т. Гусева, Б.А. Красун, М.А. Исаева, Т.Ю. Марцева, В.В. Мулюкова, Е.С. Климов, М.В. Бузаева // *Вестник ЮУрГУ. Серия Химия*. – 2016. – Т. 8 (2). – С. 40–50.

Информация об авторах

Людмила Сергеевна Рыбникова, доктор геолого-минералогических наук, главный научный сотрудник лаборатории экологии горного производства, Институт горного дела УрО РАН, Россия, 620219, г. Екатеринбург, ул. Мамина-Сибиряка, 58; luserib@mail.ru; <https://orcid.org/0000-0002-4221-7879>

Петр Андреевич Рыбников, кандидат геолого-минералогических наук, заведующий лабораторией геоинформационных и цифровых технологий в недропользовании, Институт горного дела УрО РАН, Россия, 620219, г. Екатеринбург, ул. Мамина-Сибиряка, 58; ribnikoff@yandex.ru; <https://orcid.org/0000-0002-7829-5035>

Вера Юрьевна Наволокина, научный сотрудник лаборатории геоинформационных и цифровых технологий в недропользовании, Институт горного дела УрО РАН, Россия, 620219, г. Екатеринбург, ул. Мамина-Сибиряка, 58; vunavolokina@gmail.com; <https://orcid.org/0000-0002-1547-9451>

Поступила в редакцию: 10.11.2023

Поступила после рецензирования: 26.01.2024

Принята к публикации: 09.09.2024

REFERENCES

1. Favas P.J.C., Pratas J., Gomes M.E.P. Hydrochemistry of superficial waters in the Adoria mine area (Northern Portugal): environmental implications. *Environmental Earth Sciences*, 2012, vol. 65, pp. 363–372.
2. Soltani N., Moore F., Keshavarzi B., Sharifi R. Geochemistry of trace metals and rare earth elements in stream water, stream sediments and acid mine drainage from Darrehzar Copper Mine, Kerman, Iran. *Water Quality, Exposure and Health*, 2014, vol. 6, no. 3, pp. 97–114.
3. Korneeva T.V., Yurkevich N.V., Aminov P.G. Geochemical features of migration flows in the conditions of mining technogenesis (Mednogorsk). *Bulletin of the Tomsk Polytechnic University. Geo Assets Engineering*, 2017, vol. 328, no. 2, pp. 85–94. (In Russ.)
4. Nordstrom D.K. Hydrogeochemical processes governing the origin, transport and fate of major and trace elements from mine wastes and mineralized rock to surface waters. *Applied Geochemistry*, 2011, vol. 26, pp. 1777–1791.

5. Korneeva T.V., Yurkevich N.V., Saeva O.P. Geochemical modeling of the behavior of heavy metals in technogenic systems. *Bulletin of the Tomsk Polytechnic University. Geo Assets Engineering*, 2018, vol. 329, no. 3, pp. 89–101. (In Russ.)
6. Vorobyova D.A., Evtugina Z.A. Forms of migration of nickel and copper in ultra-fresh waters of the central part of the Kola region. *Bulletin of Transbaikal State University*, 2021, vol. 27, no. 5, pp. 6–16. (In Russ.)
7. Krainov S.R., Ryzhenko B.N., Shvets V.M. *Geochemistry of groundwater. Theoretical, applied and environmental aspects*. Moscow, Nauka Publ., 2004. 672 p. (In Russ.)
8. Novikov D.A., Shokhin A.E., Chernykh A.V., Dultsev F.F. Forms of migration of chemical elements in underground waters of the horizon. *Proceedings of the Fersman scientific session of the State Institute of the KSC RAS*, 2019, vol. 16, pp. 448–453. (In Russ.)
9. Rybnikova L.S., Rybnikov P.A., Navolokina V.Y. Rehabilitation of man-made formation of abandoned copper pyrite deposits on the example of Levikhinsky mine (Middle Urals). *Bulletin of the Tomsk Polytechnic University. Geo Assets Engineering*, 2023, vol. 334, no. 8, pp. 137–150. (In Russ.)
10. Rybnikova L.S., Rybnikov P.A., Navolokina V.Y. Reducing negative impacts of dormant pyrite copper ore mine on the geosphere in the Urals. *Journal of Mining Science*, 2022, vol. 58, pp. 519–525.
11. Gustafsson J.P. *Visual MINTEQ*. 2013. Available at: <https://vminteq.lwr.kth.se> (accessed 15 June 2023).
12. Garcia-Lorenzo M.L., Marimon J., Navarro-Hervas M.C., Perez-Sirvent C., Martinez-Sanchez M.J., Molina-Ruiz J. Impact of acid mine drainages on surficial waters of an abandoned mining site. *Environmental Science and Pollution Research*, 2016, vol. 23, pp. 6014–6023.
13. Butler B.A., Ranville J.F., Ross P.E. Observed and modeled seasonal trends in dissolved and particulate Cu, Fe, Mn, and Zn in a mining-impacted stream. *Water Res*, 2008, vol. 42, pp. 3135–3145.
14. Runkel R.L., Kimball B.A., McKnight D.M., Bencala K.E. Reactive solute transport in streams: a surface complexation approach for trace metal sorption. *Water Resour Res*, 1999, vol. 35 (12), pp. 3829–3840.
15. Gijung P., Minjae J., Hwansuk K., Kristine J.B.M., Gunhui C., Sungpyo K., Young K. Seongwook O., Jaeyoung Y. Assessment of metals loading in an acid mine drainage watershed. *Mine Water Environmental*, 2016, vol. 35, pp. 44–54.
16. Alhamed M. Application of geochemical modelling to investigate the geochemical behaviors of iron in a highly complex abandoned coal mine field. *Conference: Vietnam International Water Week-VACI 2018*. Vietnam, 2018. pp. 1
17. Rybnikova L.S., Rybnikov P.A., Galin A.N. Formation of Underspoil Water Compositionat Copper–Pyrite Deposit in the Middle Urals. *Journal of Mining Science*, 2023, vol. 59, pp. 331–341.
18. Shvartsev S.L. *Hydrogeochemistry of the hypergenesis zone*. M., Nedra Publ., 1998. No. 2, 366 p. (In Russ.)
19. Malova A.I., Sidkina E.S., Ryzhenko B.N. Model of the diamond deposit named after M.V. Lomonosov as “water–rock” systems: forms of migration, saturation of groundwater relative to rock-forming and ore minerals, environmental assessment of water quality. *Geochemistry*, 2017, no. 12, pp. 1128–1140. (In Russ.)
20. Davydova O.A., Korovina E.V., Vaganova E.S., Guseva I.T., Krasun B.A., Isaeva M.A., Martseva T.Yu., Mulyukova V.V., Klimov E.S., Buzaeva M.V. Physico-chemical aspects of migration processes of heavy metals in natural water systems. *Bulletin of SUSU. Chemistry series*, 2016, vol. 8 (2), pp. 40–50. (In Russ.)

Information about the authors

Liudmila S. Rybnikova, Dr. Sc., Chief Researcher, Institute of Mining of the Ural Branch of the Russian Academy of Sciences, 58, Mamin-Sibiryak street, Ekaterinburg, 620219, Russian Federation; luserib@mail.ru; <https://orcid.org/0000-0002-4221-7879>

Petr A. Rybnikov, Cand. Sc., Head of the Laboratory of Geoinformation and Digital Technologies in Subsoil Use, Institute of Mining of the Ural Branch of the Russian Academy of Sciences, 58, Mamin-Sibiryak street, Ekaterinburg, 620219, Russian Federation; ribnikoff@yandex.ru; <https://orcid.org/0000-0002-7829-5035>

Vera Yu. Navolokina, Researcher, Institute of Mining of the Ural Branch of the Russian Academy of Sciences, 58, Mamin-Sibiryak street, Ekaterinburg, 620219, Russian Federation; vunavolokina@gmail.com; <https://orcid.org/0000-0002-1547-9451>

Received: 10.11.2023

Revised: 26.01.2024

Accepted: 09.09.2024

УДК 550.834
DOI: 10.18799/24131830/2024/9/4792
Шифр специальности ВАК: 1.2.1, 1.6.11

Анализ применения методов машинного обучения в задачах классификации пород на образцах керна

А.И. Кочегуров, В.И. Денисов[✉], Е.А. Задорожных

Национальный исследовательский Томский политехнический университет, Россия, г. Томск

[✉]10rnet.dv@gmail.com

Аннотация. Актуальность. Исследования керна в нефтегазовой отрасли позволяют получить некоторые фильтрационно-емкостные характеристики горных пород, а также дать представление о самом составе и строении недр. Данная информация крайне важна на первых этапах разработки месторождений, так как позволяет сформировать первичный вариант проекта разработки, который далее уточняется по ходу разбуривания месторождения. Однако выполнение анализа керна и его описание является крайне трудоемкой и подверженной влиянию человеческого фактора работой, требующей автоматизации. Таким образом, исследование изображений керна – востребованная задача в нефтегазовой отрасли, которая требует высокой точности и внимательности в ходе работы; особенно учитывая объем изображений, который приходится анализировать. **Целью** данной работы является обзор и анализ существующих алгоритмов классификации пород по изображениям керна на основе методов машинного обучения, а также использование полученной информации для формирования рекомендаций для развития данных алгоритмов. **Методы:** методы машинного обучения, в том числе нейронные сети. **Результаты.** Проведен анализ существующих подходов к исследованию образцов керна. Были отмечены основные преимущества и недостатки каждого из них, и на основании сделанных выводов разработан план и требования к проведению дальнейшего исследования образцов керна средствами машинного обучения. С применением сверточной нейронной сети на архитектуре U-Net была обучена модель для решения задачи сегментации образцов керна на дневных изображениях; приведены результаты работы модели.

Ключевые слова: исследование образцов керна, машинные методы обучения, сегментация и классификация, нейронные сети

Благодарности: Работа выполнена при поддержке гранта РНФ (№ 23-21-00259).

Для цитирования: Кочегуров А.И., Денисов В.И., Задорожных Е.А. Анализ применения методов машинного обучения в задачах классификации пород на образцах керна // Известия Томского политехнического университета. Инжиниринг георесурсов. – 2024. – Т. 335. – № 9. – С. 148–159. DOI: 10.18799/24131830/2024/9/4792

UDC 550.834
DOI: 10.18799/24131830/2024/9/4792

Analysis of applying machine learning methods in rock classification problems on core samples

A.I. Kochegurov, V.I. Denisov[✉], E.A. Zadorozhnykh

National Research Tomsk Polytechnic University, Tomsk, Russian Federation

[✉]10rnet.dv@gmail.com

Abstract. Relevance. Core studies in the oil and gas industry allow us to obtain some filtration and capacity characteristics of rocks, as well as to give an idea of the composition and structure of the subsoil. This information is extremely important in the early stages of field development, as it allows us to formulate a primary version of the development project, which is then refined during the course of field drilling. However, core analysis and description are an extremely labor-intensive and human-influenced works that require automation. Thus, core image research is a popular task in the oil and gas industry that requires high accuracy and care during work; especially considering the volume of images that have to be analyzed. **Aim.** To

review and analyze existing algorithms for classifying rocks from core images based on machine learning methods; as well as to use the information obtained to formulate recommendations for the development of these algorithms. **Methods.** Machine learning methods, including neural networks. **Results.** The work analyzed existing approaches to the study of core samples. The main advantages and disadvantages of each of them were noted and, based on the findings, a plan and requirements for conducting further research on core samples using machine learning were developed. As a result, using a convolutional neural network on the U-Net architecture, the authors have trained a model to solve the problem of segmentation of core samples in daytime images and presented the results of the model operation.

Keywords: core sample research, machine learning methods, segmentation and classification, neural networks

Acknowledgements: The research was supported by RSF (project no. 23-21-00259).

For citation: Kochegurov A.I., Denisov V.I., Zadorozhnykh E.A. Analysis of applying machine learning methods in rock classification problems on core samples. *Bulletin of the Tomsk Polytechnic University. Geo Assets Engineering*, 2024, vol. 335, no. 9, pp. 148–159. DOI: 10.18799/24131830/2024/9/4792

Введение

В настоящее время автоматизация работы специалистов при помощи специализированного программного обеспечения (ПО) не является чем-то новым. Сам процесс автоматизации зародился очень давно и продолжается до сих пор, меняя лишь свой облик.

Среди преимуществ автоматизации на основе информационных технологий можно отметить следующее: увеличение производительности и эффективности процесса; часто значительное сокращение времени выполнения задачи; лучший контроль за текущим процессом и связанными с ним данными, а также его прозрачность и видимость; немаловажным является стандартизация полученного результата и самого процесса; снижение ошибки, связанной с человеческим фактором.

Не исключением стала и область исследования образцов керна. Керна представляет собой некоторый объем горной породы, обычно в виде образца цилиндрической формы. Именно на основе анализа керна устанавливаются значения характеристик пласта и выводятся зависимости, позволяющие строить гидродинамические модели месторождений, без которых сейчас немислим сам процесс разработки недр [1].

Изображения образцов керна позволяют:

- запечатлеть исходный вид и положение керна, что делает возможным восстановление информации об образце в случае его деформации/утраты по каким-либо причинам;
- получить представление о строении разреза скважины;
- сделать предположение о нефтенасыщенных интервалах, за счет чего можно сделать предварительное заключение о нефтенасыщенности;
- определить маркирующие слои и стратиграфические границы;
- спрогнозировать распространение коллекторов и флюидопоров и их свойства;
- получить представление о некоторых параметрах пород: текстуре, литологической разности,

структуре, а также об их гелого-физических характеристиках;

- перечисленные выше данные позволяют формировать базу, которая в последующем позволит подбирать месторождения-аналоги по параметрам керна.

Главная цель анализа керна – получение данных о недрах. Проведенные исследования породы дают возможность говорить о строении геологического разреза, геолого-физических характеристиках объекта и составе пород, геохимических показателях и насыщении пластов, а также о положении стратиграфических границ, реперных слоев и нахождении коллекторов.

Таким образом, керна является крайне важным источником информации, который оказывает сильное влияние на способ разработки месторождения. Изображения пород представляют собой один из основных источников информации для проведения литолого-фациального анализа на ранних этапах разработки. Кроме прочего, по фотографиям керна можно провести реконструкцию условий осадконакопления.

В общем случае можно сказать, что исследование керна является эффективным инструментом прогноза геологического разреза, решению задач которого посвящено достаточно большое число работ, в том числе на основе результатов фазочастотного прослеживания сейсмических волн [2–4].

Применение нейронных сетей для классификации пород на образцах керна

В настоящее время применение современных технологий, таких как машинное обучение, для анализа образцов керна является распространенным методом исследования. Данная тенденция, как отмечалось выше, является следствием большого объема информации, которую требуется обработать, а также сложности идентификации пород при решении задачи классификации. В этом плане значительное место занимают методы машинного обучения, и прежде всего нейронные сети.

Вопросам использования нейронных сетей для классификации пород на образцах керна посвящен ряд работ, среди них важное место занимают исследования А. Пателя [5–7], наиболее интересные результаты которых опубликованы в [5, 6]. Так, в [5] описывается процесс автоматизации, анализа и классификации типов известняковых пород на основе импульсной нейронной сети. Ценность рассматриваемой работы заключается в том, что автор отходит от наиболее часто используемой в подобных работах сверточной нейронной сети и применяет импульсную нейронную сеть (pulsed neural network – PNN). Особенностью данного вида сетей является то, что они способны распознать целый класс (объект) по малому количеству пикселей в

динамическом кадре. Эти сети очень близки к мозгу и состоят из очень большого количества узлов

Автор обосновывает свой выбор тем, что вероятностный нейрон сети имеет сходство с моделью обратного распространения в том, как он направляется. Однако у PNN есть отличия в процедуре обучения. Архитектура PNN состоит из входного слоя, слоя паттернов (pattern layer), слоя суммирования и выходного слоя. Слой паттернов имеет сходство с сетью с радиальными функциями, однако слой суммирования имеет подобие конкурентной сети. Архитектура PNN, использованная автором, показана на рис. 1.

Методология классификации, предложенная в [5], изображена на рис. 2.

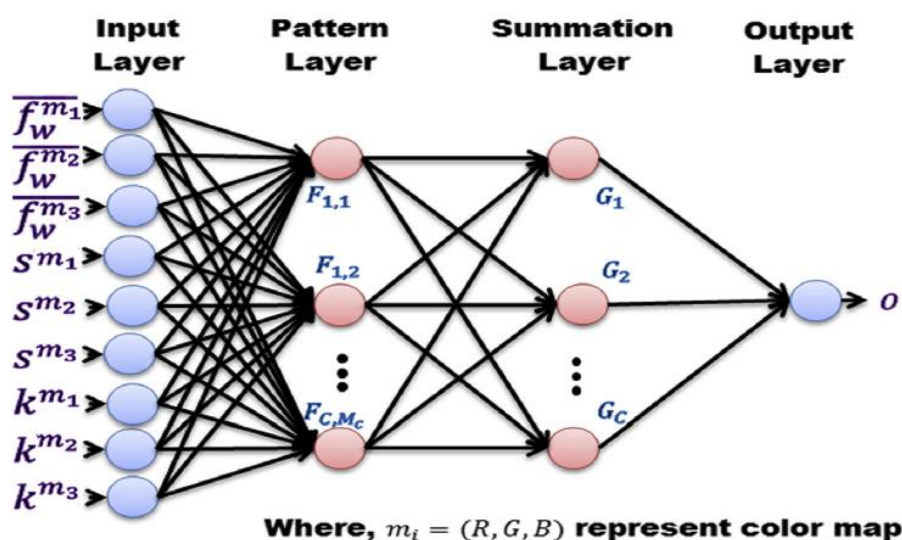


Рис. 1. Архитектура PNN

Fig. 1. PNN architecture

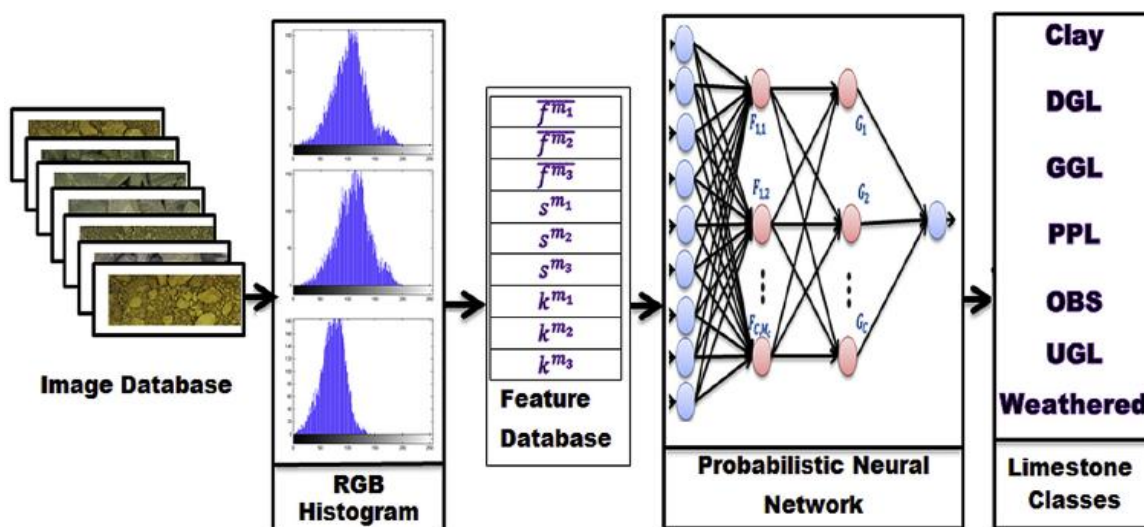


Рис. 2. Методология классификации

Fig. 2. Classification methodology

Среди прочего стоит отметить, что в работе использовались унифицированные входные данные, собранные одним исследователем в едином виде. Кроме того, отсутствует анализ работы на реальных геологических образцах со сложными структурными и текстурными особенностями.

В заключение автор говорит, что основным ограничением данного исследования является то, что использовались цельные куски горных пород, в которые были вкраплены более мелкие образцы горных пород. Таким образом, алгоритм будет работать корректно только тогда, когда тип породы всех мелких включений в образце одинаков. Данная проблема может быть нивелирована путем сегментации изображения – тогда алгоритм и классификацию можно будет применять к различным включениям на изображении.

В [6] описывается проектирование и разработка системы на основе искусственных нейронных сетей с целью автоматизированного определения характеристик угля. Особенностью рассматриваемой системы является то, что она использует сегментацию изображения для дальнейшей классификации объектов. Другими словами, на исходном изображении отбрасывается фон, а далее рассматриваются только сами образцы угля. Методология данной системы представлена на рис. 3.

Последующий анализ выделенных образцов угля выполняется при помощи анализа их цветности. Обученная сеть по цветности пород выделяет основные характеристики. Примеры анализа цветности пород по цифровым изображениям керна, представленные в литературных источниках, будут рассмотрены ниже.



Рис. 3. Методология системы
Fig. 3. System methodology

Еще одно важное и интересное исследование применения нейронных сетей для анализа пород рассмотрено в работе [8]. Здесь авторы приводят результаты исследования, целью которого было создание алгоритма, позволяющего определить тип породы образца керна. Одна из основных особенностей работы заключается в том, что авторами был избран подход, согласно которому производится сегментация изображения с заданным шагом. После этого для каждого полученного сегмента вычисляется вероятность нахождения в нём конкретного типа породы (рис. 4). Кроме того, если это возможно, то еще определялись дополнительные параметры (нефтенасыщенность, пористость, проницаемость) для данного сегмента керна.

При проведении исследования авторами активно использовались открытые библиотеки Python для машинного обучения и обработки данных Google TensorFlow [9], Keras [10], PIL [11], NumPy [12], Scikit-Learn [13] и OpenCV [14]. Для повышения точности работы нейронной сети и уменьшения риска переобучения был применен алгоритм Dropout [15].

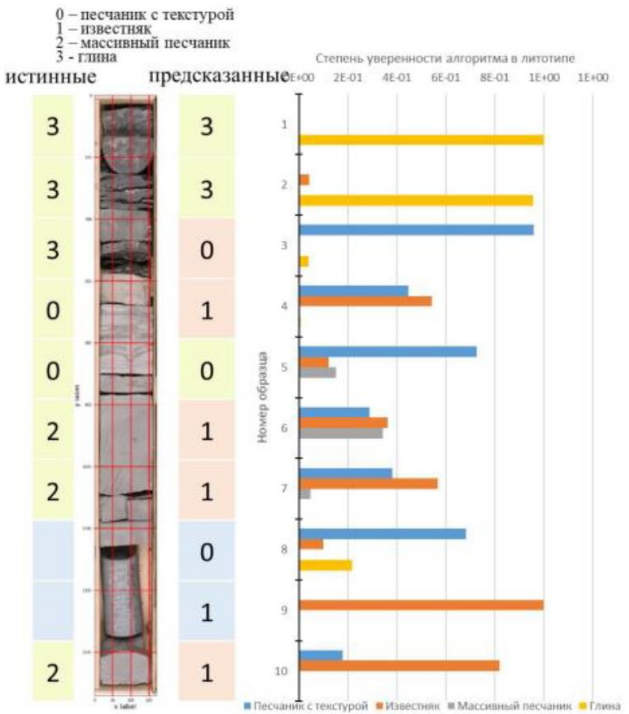


Рис. 4. Пример определения породы сегмента
Fig. 4. Example of determining a segment rock

Все это позволило авторам статьи написать глубокую сверточную нейронную сеть, для которой производились различные эксперименты с глубиной сети, количеством нейронов на слоях, функциями распространения ошибок и размерами изображений.

жений. Для обучения нейронной сети было использовано 800 изображений, приведённых к размеру 512×512 пикселей, составляющих 6 классов. В качестве обучающей выборки было использовано 60 % собранного материала и, соответственно, 40 % составляла тестовая выборка. Результаты, как говорят авторы статьи, показали до 96 % точности и 98 % полноты. Однако на некоторых классах (известняк, 124 образца) результаты падают до 42 % точности.

Несмотря на показанные в работе возможности использования нейронной сети для определения литотипов образцов керна, разработанный алгоритм имеет определенные недостатки, а именно: недостаточную обучающую выборку, неравномерность количества литотипов в обучающей выборке (сеть обрабатывает лишь 4 класса пород), низкую точность предсказаний для определенных классов пород.

Таким образом, нейросеть работает с большой точностью лишь при соблюдении ряда обязательных условий. Отдельно стоит упомянуть, что данная сеть выполняет описание керна не послойно, а с заданным шагом, что сильно влияет на результаты.

В работе [16] рассматривается создание инструмента предобработки и анализа фотографий керна. При этом важная роль отводится восстановлению поврежденных участков образца керна. Известно, что такие повреждения даже с учетом восстановления их при помощи заливки на основе окружения дают ощутимые погрешности при обучении нейросети.

Разработанная авторами статьи нейросеть позволяет выделить участки слоистости керна, а также получить информацию о положении границ выделенных участков керна – их глубины и видимые углы падения. При этом в обучающей выборке присутствовали, в том числе, образцы с поврежденными участками вследствие отбора из них проб.

Таким образом, в ходе работы была построена система, которая позволяет ускорить описание образцов керна специалистом-геологом. Другими словами, нейросеть сама не проводит анализ, а упрощает в дальнейшем проведение анализа человеком-оператором.

Также интересные результаты получены в [17], где определялась принадлежность слоев керна к одному из 4 типов пород: угли, песчаники, алевролиты и аргиллиты.

Выбор пород был обоснован тем, что данные 4 типа наиболее часто встречаются в обучающей выборке. Таким образом, авторы старались сделать распределение пород по классам более равномерным.

В качестве обучающей выборки авторами была использована база из 2,5 тыс. изображений пород при дневном свете. К этим изображениям также прилагалось послойное описание. Эти данные были взяты из 8 месторождений (около 15 скважин) Тюменской свиты. В итоге количество слоев составило порядка 4,4 тыс.

Особенность данной работы заключается в том, что для каждого слоя керн нарезался на квадраты 5×5 см с определенным шагом смещения в зависимости от одного из 4 типов пород. Такой прием позволил авторам сократить ошибку, вызванную неравномерным распределением пород в обучающей выборке, посредством увеличения шага для чаще встречающейся породы в выборке.

Для проведения исследований были взяты два широко используемых способа машинного обучения: на основе графических идентификаторов и на основе сверточных нейронных сетей.

В процессе эксперимента были использованы архитектуры следующих предварительно обученных нейронных сетей: SqueezeNet1.1, DenseNet121, DenseNet161, Inception-v3, ASNetLarge, PNASNet5Large, ResNet18, ResNet34, ResNet152, ResNeXt101 64×4d, ResNeXt101 32×4d, SENet154, VGG13, VGG16bn, VGG19bn.

На основании полученных результатов были сделаны выводы о вполне приемлемой точности обеих моделей, что позволяет говорить о целесообразности их использования на практике. В то же время модель на базе нейронных сетей оказалась более чувствительна к неявным признакам, которые трудно извлечь, применяя графические идентификаторы.

Однако стоит отметить, что обучающая выборка состояла из образцов, взятых из одной свиты (Тюменской), что, несомненно, влияет на качество результатов при использовании моделей на других свитах. Еще одним фактором является то, что в сравнении с, например, работой [8], в работе [17] были выделены лишь 4 класса.

Анализ цветности пород по цифровым изображениям керна

Еще одним интересным и важным применением компьютерного анализа данных для решения задач классификации пород является анализ цветности по цифровым изображениям керна. В этом направлении значительное место занимают работы И.И. Хасанова [18–20], посвященные полуавтоматической обработке фотографий керна горных пород. В его работах напрямую не используются методы машинного обучения, а применяются экспертные системы на основе цветности изображения.

Так, в работе [19] И.И. Хасанов описывает разработанное им программное обеспечение, которое

делит процесс анализа керна на три этапа. На первом этапе происходит фотографирование образцов керна согласно определенному регламенту, в котором указаны параметры съемки, температура накаливания, вид ламп и особенности самой процедуры. Кроме того, при съемке керна используются таблицы эталонных цветов.

На втором этапе ПО на основании загруженных фотографий делит каждый образец на ячейки заданного размера и по ним строит таблицу с усредненными для каждой ячейки параметрами. В этой таблице высчитываются такие показатели, как значения цвета в схемах RGB или HSL. Кроме того, на данном этапе строится колонка средних цветов по скважине, а также определяются коэффициенты расчлененности и неоднородности.

На третьем этапе происходит выбор интервала скважины, который будет анализироваться, задание исходных параметров, представление и визуализация результатов.

Если сформулировать основную особенность данного приложения, то оно работает по типу экспертной системы – то есть изображение преобразуется в матрицы в различных цветовых схемах (RGB или HSL), после чего каждому классу цвета оператором присваивается та или иная характеристика породы (пористость, проницаемость и т. д.), присущая этому цвету, и ее литотип. Далее исследуются вариации параметров отдельных цветов и гистограммы распределения этих цветов. Стоит отметить, что исследование предусматривает обработку изображений, полученных как при дневном свете, так и при ультрафиолетовом.

Основными преимуществами данной работы являются:

- внимание к таким деталям, как процесс съемки образцов керна и наличие четкого регламента для съемки;
- использование помимо дневных УФ-фотографий;
- сопоставление результатов работы ПО с данными ГИС и петрофизическими исследованиями скважин.
- К недостаткам, на наш взгляд, можно отнести следующее:
- необходимость активного привлечения к работе специалиста-геолога для формирования базы знаний;
- наличие человеческого фактора как при задании параметров при работе с системой, так и при формировании базы знаний;
- разбиение на интервалы и усреднение показателей, что может привести к тому, что какая-то порода будет не определена, или ни одна из пород в этом сегменте не будет определена верно;
- отсутствие влияния структуры керна, так как один лишь цвет породы далеко не всегда может

служить надежным источником информации о литотипе;

- отсутствие влияния различных внешних факторов, таких как биологические включения, наличие элементов, привнесенных в процессе бурения/извлечения керна.

Близкий к рассмотренному в работе Хасанова подход описан в [21]. Здесь цветность и тип породы анализируются аналогично. Так, для каждого образца породы формируются его цветовые характеристики. Затем подвергается анализу вся скважина, на основании чего составляется литологическая колонка, размеченная по цвету. Определяются граничные значения цветов, которые соответствуют различным литотипам. Недостатки работы [21] во многом совпадают с недостатками в работе [19].

В работе [22] исследуются образцы керна, сфотографированные при дневном свете в высоком разрешении. Недостающие части керна на фотографиях (к примеру, изъятые образцы в виде цилиндрических проб) заполняются согласно окружающим текстуре и структуре по методу многоточечной статистики (multipoint statistics – MPS), что, естественно, уменьшает точность. Основным недостатком работы является проведение сравнения с библиотекой образцов путём выделения в явном виде таких параметров, как контрастность, интенсивность пикселей, что не является объективным описанием горных пород и зависит от условий съёмки. Также отсутствует описание изображений, сделанных при ультрафиолетовом освещении.

Таким образом, проведенный анализ основных методов и подходов в области классификации пород на образцах керна позволяет сделать следующие выводы:

- одним из основных недостатков большей части работ является неравномерность обучающей выборки. При определении типа породы обучающая выборка состоит из пород преимущественно одного или нескольких литотипов, или и вовсе анализируются не все литотипы; выборка же по остальным литотипам искусственно увеличена;
- во многих работах не рассматриваются изображения образцов керна в ультрафиолетовом свете, хотя ультрафиолетовое свечение позволяет выделять на изображениях нефтенасыщенные участки. Выделение таких участков позволяет говорить о наличии флюида на том или ином интервале;
- почти все рассмотренные работы сосредоточены на том, чтобы определить тип породы, причем чаще всего на основании цветности. Однако стоит принять во внимание, что съемка без наличия палитры может дать искажения цвета (исключением являются работы [18–20]). Тогда

такие изображения не позволят достоверно определить литотип по цветности. Кроме того, цветность пород ввиду различных явлений может различаться;

- в некоторых работах при определении типа породы используется либо фиксированный, либо настраиваемый шаг по изображению керна. При таком методе, если в диапазоне одного шага будут находиться несколько пород, система не сможет выделить их, что в конечном итоге приведет к неверному результату;
- часть рассмотренных решений не позволяет производить полную автоматизацию, а лишь упрощает в некоторой степени работу специалиста-геолога.

Кроме того, во всех рассмотренных работах задача классификации выполнялась примерно одинаково. На изображении с несколькими образцами керна обрезался конкретный образец, причем неровности, края образца, тоже обрезались. Далее выбирался размер окна, и обрезанный керн, согласно этим размерам, делился на интервалы. Исследования проводились отдельно внутри каждого интервала, в результате чего определялся тип породы в интервале. Такой алгоритм классификации имеет существенные недостатки, так как:

- рассматривается не весь образец керна;
- требуется ручная обрезка каждого образца;
- в анализируемом интервале определяется только одна порода, хотя в нем может находиться и большее число пород.

Направление развития методов классификации пород на образцах керна Алгоритм сегментации на основе сверточных нейронных сетей

Как показано выше, одним из ключевых факторов, который влияет на качество классификации керна по литотипам, является исходный материал, для которого выполняются исследования. Поэтому первым шагом развития методов классификации является сегментация образцов керна. Это позволит значительно сократить трудозатраты, связанные с ручной обрезкой образцов керна, а также сделает анализ более точным, так как будут учитываться неровности керна, которые ранее при использовании нейронной сети обрезались (рис. 5).

Кроме того, при наличии сильно раздробленных образцов (рис. 6) обрезать их так, чтобы исключить влияние коробки, в которой они лежат, становится крайне трудоемкой и долгой задачей. Сегментация керна решает и эту проблему.



Рис. 5. Части керна, которые не учитываются при обрезке
Fig. 5. Parts of the core that are not taken into account when trimming



Рис. 6. Пример раздробленных образцов керна для анализа
Fig. 6. Example of crushed core samples for analysis

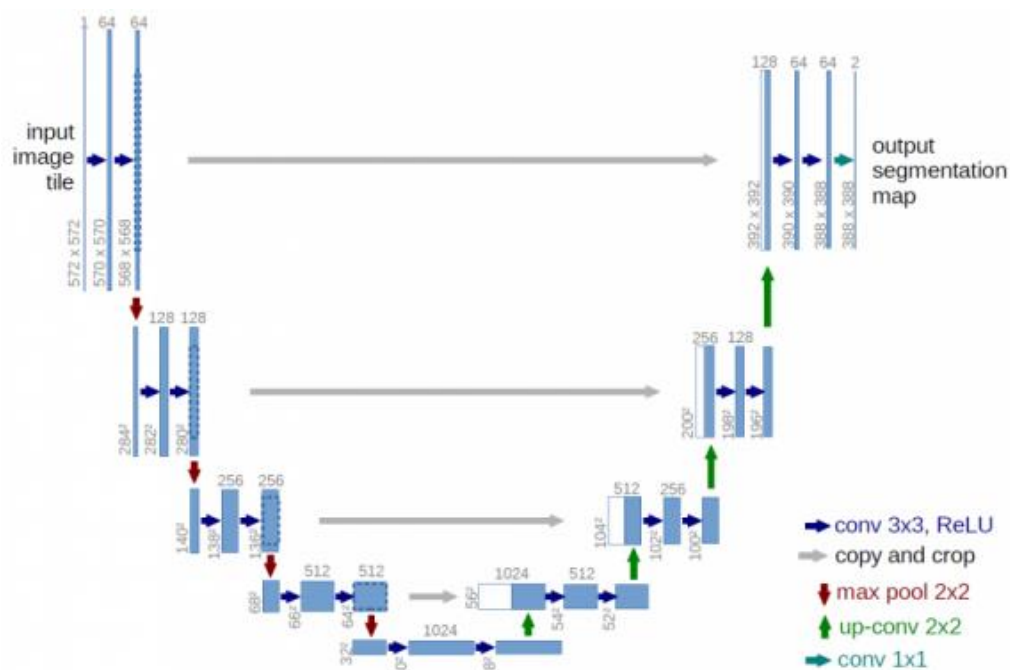


Рис. 7. Архитектура сети U-Net

Fig. 7. U-Net network architecture

Для реализации алгоритма сегментации была выбрана свёрточная нейронная сеть с архитектурой U-Net, поскольку это достаточно простая и типичная архитектура нейронной сети, способная распознавать объекты на изображениях. В дальнейшем развитии работы возможно применение более продвинутых и сложных моделей, таких как ResNet и GoogleNet. Архитектура сети U-Net приведена на рис. 7. Она состоит из сужающегося пути (слева) и расширяющегося пути (справа). Сужающийся путь – типичная архитектура сверточной нейронной сети.

В ходе работы использовались реальные фотографии керн с разрешением 4000×4000 пикселей. Перед проведением вычислительного эксперимента были сформулированы следующие требования:

- для более полного анализа использовать ультрафиолетовые фотографии;
- выбирать изображения высокого качества;
- применять алгоритм Dropout [15];
- использовать более широкий класс пород на скважинах, с которых отбирается керн.

Однако в ходе эксперимента для того, чтобы избежать проблем с неоднородными образцами [23], корректного наложения ультрафиолетовых фотографий и более эффективного обучения сети, было принято решение первоначально выполнить сегментацию образцов керн на дневных изображениях. На первом этапе сегментации производилось обучение нейронной сети распознавать, где на фотографии находится порода, и где прочие объекты.

На основе каждой фотографии в обучающем наборе с использованием средств Photoshop была создана бинарная маска (содержащая строго два цвета – чёрный и белый), где чёрный цвет – отсутствие породы, белый – её наличие. На рис. 8, 9, соответственно, представлены фотография керн для обучения U-Net и маска фотографии керн.

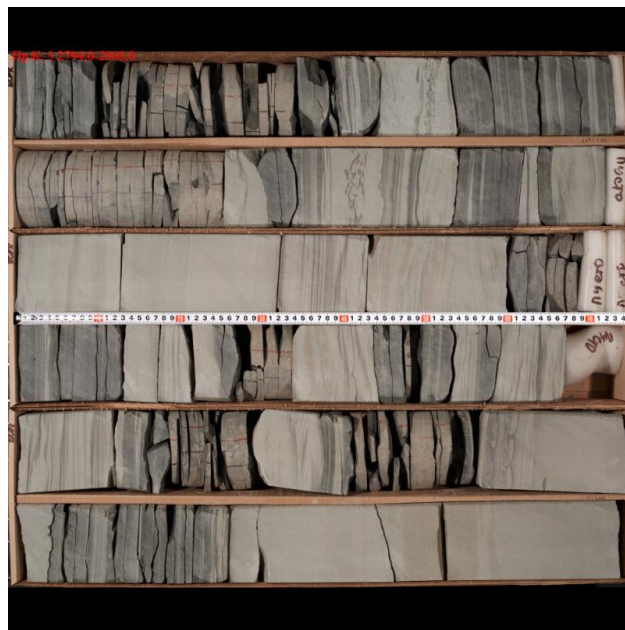


Рис. 8. Фотография керн для обучения U-Net

Fig. 8. Photo of core for U-Net training

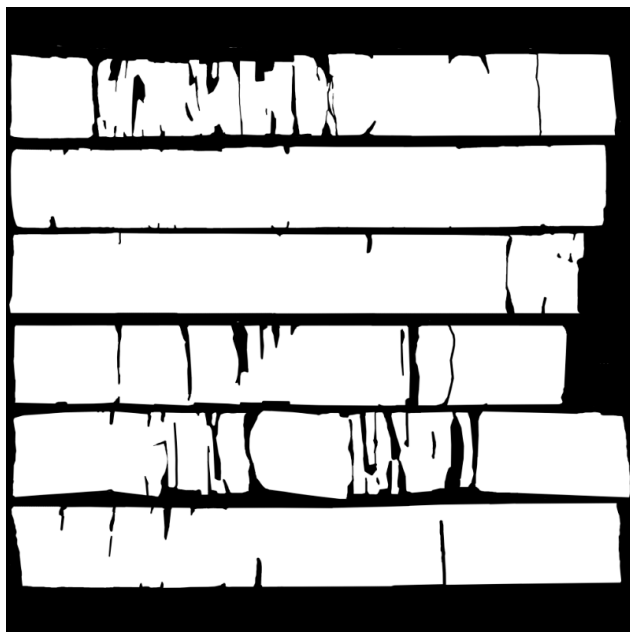


Рис. 9. Маска фотографии керна
Fig. 9. Core photography mask

С учётом того, что на одной фотографии находится в среднем пять образцов керна (на некоторых может быть два, на других шесть) по 3 м каждый, суммарный объем обучающей выборки составлял около 900 м керна. Тестовая выборка, предназначенная для сегментирования нейронной сетью, содержала примерно 180 м керна, что составляет 20 % от обучающей выборки. Нейронная сеть была обучена два раза: на 450 м керна с проходом 10 эпох и на 900 м керна с проходом 20 эпох.

В качестве примера на рис. 10, 11 представлены тестовая фотография и результат сегментации для модели, представляющей 900 м керна с проходом 20 эпох.



Рис. 10. Тестовая фотография керна
Fig. 10. Core test photo

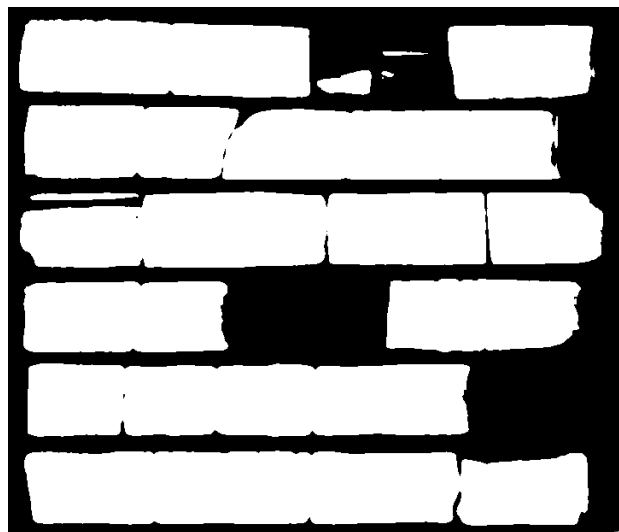


Рис. 11. Результат сегментации
Fig. 11. Segmentation result

Из сопоставления рисунков видно, что все ровные участки размечены правильно, однако раздробленные участки керна нейронная сеть не распознаёт как породу. Это говорит о том, что нейронная сеть при сегментации ориентируется не только на цвет, но и на форму, при этом она обучена распознавать только ровные образцы, из-за чего раздробленные примеры размечает как посторонние объекты. Это говорит о необходимости обучения нейронной сети не только на ровных, но и на раздробленных образцах породы.

Для количественной оценки качества сегментации была рассчитана функция потерь, которая показана на рис. 12.

Из приведенного рисунка видно, что с ростом эпох ошибка уменьшается и уже после 7–8 эпохи принимает достаточно малые значения. Однако стоит отметить, что функция потерь была рассчитана для примеров из обучающей выборки, а для модели на тестовых изображениях она может иметь более высокие значения, так как нейронная сеть не была обучена на раздробленных образцах породы.

Заключение

Проведен анализ существующих методов и подходов к решению задачи классификации пород на образцах керна. Рассмотрено применение методов машинного обучения и компьютерный анализ цветности пород. Показано, что в большинстве работ основное внимание уделено обработке фотографий керна, полученных в дневном свете. При этом хорошо известно, что ультрафиолетовое свечение позволяет выделять на изображениях нефтенасыщенные участки, которые говорят о наличии флюида в рассматриваемом интервале.

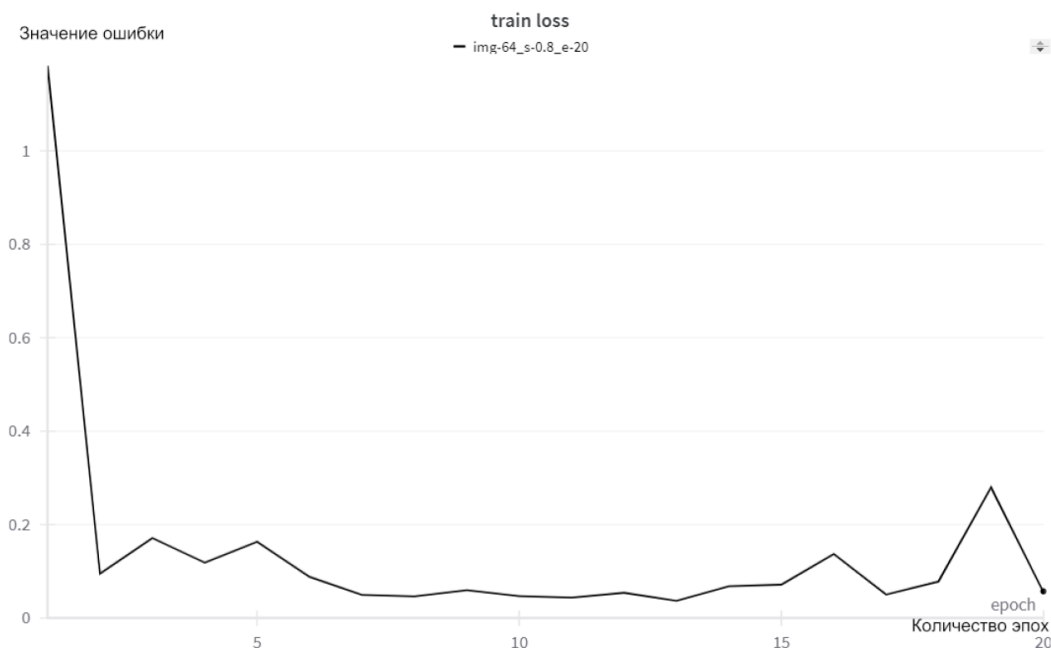


Рис. 12. График функции потерь

Fig. 12. Loss function graph

Также следует отметить, что в ряде работ при определении типа породы используют либо фиксированный, либо настраиваемый шаг по изображению керна, что позволяет в пределах одного интервала глубин выделить только одну породу, хотя на самом деле там может находиться несколько пород. Еще одним недостатком рассмотренных методов является удаление неровностей керна, которые при использовании машинных методов анализа, в том числе применения нейронных сетей, обрезались. Все это позволило разработать план и требования к проведению дальнейшего исследования образцов керна средствами машинного обучения. При этом было показано, что первым шагом развития методов классификации образцов керна должна являться сегментация изображений.

В результате с применением сверточной нейронной сети на архитектуре U-Net была обучена

модель для решения задачи сегментации образцов керна на дневных изображениях и приведены результаты работы модели, которые показали вполне приемлемую точность распознавания породы и прочих объектов.

В дальнейшем планируется обучение моделей на основе других архитектур сверточных нейронных сетей и проведение сравнительного анализа, расширение обучающей выборки для улучшения качества сегментации на неоднородных образцах породы, сравнение результатов работы модели с объединёнными выборками монолитного и раздробленного керна и с разъединёнными выборками, на которых модель обучается отдельно, а также решение задач сегментации образцов керна на ультрафиолетовых изображениях для определения нефтенасыщенных интервалов.

СПИСОК ЛИТЕРАТУРЫ

1. Особенности изучения фильтрационных характеристик ориентированного керна сложнопостроенных карбонатных коллекторов / И.П. Гурбатова, В.В. Плотников, Н.А. Попов, И.В. Сысоев // Вестник ПНИПУ. Геология. Нефтегазовое и горное дело. – 2013. – № 9. – С. 79–86.
2. Informational technologies of processing and interpretation of data for surface and in wells seismic observations for solving of tasks of geological section prognosis / V.P. Ivanchenkov, O.N. Vylegzhanin, O.V. Orlov, A.I. Kochegurov // Proc. 9th Russian–Korean International Symposium on Science and Technology. KORUS–2005. – Novosibirsk, 2005. – Vol. 1. – P. 159–162.
3. Иванченков В.П., Кочегуров А.И., Орлов О.В. Применение методов фазочастотного анализа сейсмических волн для изучения околоскважинного пространства // Нефтяное хозяйство. – 2015. – № 10. – С. 58–63.
4. Kochegurov A.I., Kochegurova E.A., Kupina N.A. Detection accuracy of the temporary state of complex signals using phase-frequency tracking methods with equilibrium and non-equilibrium processing // Advances in Intelligent Systems and Computing. – 2015. – Vol. 342. – P. 27–36.
5. Patel A.K., Snehomoy C. Computer vision-based limestone rock-type classification using probabilistic neural network // Geoscience Frontiers. – 2016. – № 7. – P. 53–60.
6. Design and development of a machine vision system using artificial neural network-based algorithm for automated coal characterization / A.G. Gorai, S. Raval, A.K. Patel, C. Snehomoy, T. Gautam // International Journal of Coal Science & Technology. – 2020. – № 8. – P. 737–755.

7. Patel A., Snehamoy C., Gorai A.K. Development of online machine vision system using support vector regression (SVR) algorithm for grade prediction of iron ores // Fifteenth IAPR International Conference on Machine Vision Applications (MVA). – Nagoya, 2017. – P. 149–152.
8. Литологическая интерпретация фотографий керна на основе компьютерного анализа / А.В. Ивченко, Е.Е. Барабошкин, Л.С. Исмаилова и др. // IEEE Northwest Russia Conference On Mathematical Methods In Engineering And Technology: MMET NW 2018: Международная научная конференция. – СПб: СПбГЭТУ «ЛЭТИ», 2018. – С. 430–433.
9. Введение в TensorFlow // TensorFlow. URL: <https://www.tensorflow.org/learn?hl=ru> (дата обращения: 06.10.2023).
10. Keras. Get Started // Keras. URL: <https://keras.io/> (дата обращения: 06.10.2023).
11. Pillow (PIL Fork) 10.4.0 documentation // Pillow. 2024. URL: <https://pillow.readthedocs.io/en/stable/> (дата обращения: 03.10.2023).
12. NumPy 1.26.0 released // NumPy. 2024. URL: <https://numpy.org/> (дата обращения: 03.10.2023).
13. Scikit-Learn. Getting Started // Scikit-Learn. Machine Learning in Python. URL: https://scikit-learn.org/stable/getting_started.html (дата обращения: 28.09.2023).
14. OpenCV. Modules // Open-Source Computer Vision. URL: <https://docs.opencv.org/4.x/> (дата обращения: 27.09.2023).
15. Dropout – метод борьбы с переобучением нейронной сети // Введение в нейронные сети, 2024. URL: https://proporprogs.ru/neural_network/dropout-metod-borby-s-pereobucheniem-neyronnoy-seti (дата обращения: 24.09.2023).
16. Артамонов В.П., Каюров Н.К. Автоматизация алгоритмов предобработки и анализа фотографий керна для целей процесса макро- и литологического описания // Интеллектуальный анализ данных в нефтегазовой области: Тезисы докладов 3 научно-практической конференции. – Новосибирск, 2022. URL: <https://libgeo.ru/library/data-science?filter=302> (дата обращения: 24.09.2023).
17. Дьячков С.М. и др. Автоматическое определение породы по фотографиям керна современными методами машинного обучения // Вестник Тюменского государственного университета. Серия: Физико-математическое моделирование. Нефть, газ, энергетика. – 2021. – Т. 7. – № 4 (28). – С. 181–198.
18. Новые методические аспекты литологических исследований пород баженовской свиты / А.В. Постников, О.В. Постникова, К.Ю. Оленова, И.И. Хасанов и др. // Нефтяное хозяйство. – 2015. – № 10. – С. 23–27.
19. Хасанов И.И. Анализ цветности пород по цифровым изображениям керна // Геология нефти и газа. – 2014. – № 5. – С. 33–39.
20. Khasanov I. The use of computer analysis of digital images for the study of core material // Geomodel 2015: 17th science and applied research conference on oil and gas geological exploration and development. – 2015. – Vol. 2015. – P. 1–5.
21. Patent USA № US8416413B2, 09.04.2013. Products and methods for identifying rock samples.
22. Patent USA № US2017286802, 2017. Automated core description.
23. Изучение и анализ современных подходов к построению цифровых моделей керна и методов моделирования многофазной фильтрации в масштабах порового пространства / К.М. Герке, Д.В. Корост, М.В. Карсанина, С.Р. Корост и др. // Георесурсы. – 2021. – Т. 23. – № 2. – С. 197–213.

Информация об авторах

Александр Иванович Кочегуров, кандидат технических наук, доцент отделения информационных технологий Инженерной школы информационных технологий и робототехники Национального исследовательского Томского политехнического университета, Россия, 634050, г. Томск, пр. Ленина, 30. kaicc@tpu.ru, <https://orcid.org/0000-0003-4473-528X>

Владислав Игоревич Денисов, аспирант Национального исследовательского Томского политехнического университета, Россия, 634050, г. Томск, пр. Ленина, 30. lor.net.dv@gmail.com

Елизавета Александровна Задорожных, студент Национального исследовательского Томского политехнического университета, Россия, 634050, г. Томск, пр. Ленина, 30. eaz28@tpu.ru

Поступила в редакцию: 02.08.2024

Поступила после рецензирования: 10.08.2024

Принята к публикации: 09.09.2024

REFERENCES

1. Gurbatova I.P., Plotnikov V.V., Popov N.A., Sysoev I.V. Features of studying the filtration characteristics of oriented cores of complex carbonate reservoirs. *Bulletin of PNIPU. Geology. Oil and gas and mining*, 2013, no. 9, pp. 79–86. (In Russ.)
2. Ivanchenkov V.P., Vylegzhanin O.N., Orlov O.V., Kochegurov A.I. Informational technologies of processing and interpretation of data for surface and in wells seismic observations for solving of tasks of geological section prognosis. *Proc. 9th Russian–Korean International Symposium on Science and Technology. KORUS–2005*. Novosibirsk, 2005. Vol. 1, pp. 159–162.
3. Ivanchenkov V.P., Kochegurov A.I., Orlov O.V. Methods of phase-frequency analysis of seismic waves and their application in studying borehole environment. *Neftyanoe khozyaystvo – Oil Industry*, 2015, no. 10, pp. 58–63. (In Russ.)
4. Kochegurov A.I., Kochegurova E.A., Kupina N.A. Detection accuracy of the temporary state of complex signals using phase-frequency tracking methods with equilibrium and nonequilibrium processing. *Advances in Intelligent Systems and Computing*, 2015, vol. 342, pp. 27–36.
5. Patel A.K., Snehamoy C. Computer vision-based limestone rock-type classification using probabilistic neural network. *Geoscience Frontiers*, 2016, no. 7, pp. 53–60.

6. Gorai A.G., Raval S., Patel A.K., Snehamoy C., Gautam T. Design and development of a machine vision system using artificial neural network-based algorithm for automated coal characterization. *International Journal of Coal Science & Technology*, 2020, no. 8, pp. 737–755.
7. Patel A., Snehamoy C., Gorai A.K. Development of online machine vision system using support vector regression (SVR) algorithm for grade prediction of iron ores. *Fifteenth IAPR International Conference on Machine Vision Applications (MVA)*. Nagoya, 2017. pp. 149–152.
8. Ivchenko A.V., Baraboshkin E.E., Ismailova L.S. and others. Lithological interpretation of core photographs based on computer analysis. *International scientific conference. IEEE Northwest Russia Conference on Mathematical Methods in Engineering and Technology: MMET NW 2018*. St. Petersburg, SPbSETU "LETI" Publ., 2018. pp. 430–433. (In Russ.)
9. *Introduction in TensorFlow*. (In Russ.) Available at: <https://www.tensorflow.org/learn?hl=ru> (accessed 6 October 2023).
10. *Keras. Get Started*. Available at: <https://keras.io/> (accessed 6 October 2023).
11. *Pillow (PIL Fork) 10.1.0 documentation*. Available at: <https://pillow.readthedocs.io/en/stable/> (accessed 3 October 2023).
12. *NumPy 1.26.0 released. NumPy*. Available at: <https://numpy.org/> (accessed 3 October 2023).
13. *Scikit-Learn. Getting Started. Scikit-Learn. Machine Learning in Python*. Available at: https://scikit-learn.org/stable/getting_started.html (accessed 28 September 2023).
14. *OpenCV. Modules. Open-Source Computer Vision*. Available at: <https://docs.opencv.org/4.x/> (accessed 27 September 2023).
15. *Dropout – a method for combating neural network overtraining. Introduction to neural networks*. (In Russ.) Available at: https://proproprogs.ru/neural_network/dropout-metod-borby-s-pereobucheniem-neyronnoy-seti (accessed 24 September 2023).
16. Artamonov V.P., Kayurov N.K. Automation of algorithms for preprocessing and analysis of core photographs for the purposes of the process of macro- and lithological description. *Abstracts of reports of the 3rd scientific and practical conference Intelligent data analysis in the oil and gas field*. Novosibirsk, 2022. (In Russ.) Available at: <https://libgeo.ru/library/data-science?filter=302> (accessed 24 September 2023).
17. Dyachkov S.M. Automatic determination of rock from core photographs using modern machine learning methods. *Bulletin of Tyumen State University. Series: Physical and mathematical modeling. Oil, gas, energy*, 2021, vol. 7, no. 4 (28), pp. 181–198. (In Russ.)
18. Postnikov A.V., Postnikova O.V., Olenova K.Yu., Khasanov I.I. New methodological aspects of lithological research of rocks of the Bazhenov formation. *Neftyanoe khozyaystvo – Oil Industry*, 2015, no. 10, pp. 23–27. (In Russ.)
19. Khasanov I.I. Analysis of rock color using digital core images. *Geology of Oil and Gas*, 2014, no. 5, pp. 33–39. (In Russ.)
20. Khasanov I. The use of computer analysis of digital images for the study of core material. *Geomodel 2015. 17th science and applied research conference on oil and gas geological exploration and development*, 2015, vol. 2015, pp. 1–5.
21. Ellington W.E., Moore J.C., Smith M.A. *Products and methods for identifying rock samples*. US Patent no. US8416413B2, 2013.
22. Mezghani M.M., Shammari S.H., Anifowose F.A. *Automated core description*. US Patent no. US2017286802, 2017.
23. Gerke K.M., Korost D.V., Karsanina M.V., Korost S.R. Modern approaches to pore space scale digital modeling of core structure and multiphase flow. *Georesursy*, 2021, vol. 23, no. 2, pp. 197–213.

Information about the authors

Alexander I. Kochegurov, Cand. Sc., Associate Professor, National Research Tomsk Polytechnic University, 30, Lenin avenue, Tomsk, 634050, Russian Federation. kaicc@tpu.ru, <https://orcid.org/0000-0003-4473-528X>

Vladislav I. Denisov, Postgraduate Student, National Research Tomsk Polytechnic University, 30, Lenin avenue, Tomsk, 634050, Russian Federation. 10rnet.dv@gmail.com

Elizaveta A. Zadorozhnykh, Student, National Research Tomsk Polytechnic University, 30, Lenin avenue, Tomsk, 634050, Russian Federation. eaz28@tpu.ru

Received: 02.08.2024

Revised: 10.08.2024

Accepted: 09.09.2024

УДК 631.436:551.34

DOI: 10.18799/24131830/2024/9/4456

Шифр специальности ВАК: 1.6.12

Температурный режим торфяников Западной Сибири вблизи южной границы распространения многолетнемерзлых пород

Д.В. Московченко^{1✉}, А.А. Губарьков², А.В. Фахретдинов¹

¹ Институт проблем освоения Севера ТюмНЦ СО РАН, Россия, г. Тюмень

² Тюменский индустриальный университет, Россия, г. Тюмень

✉ moskovchenko1965@gmail.com

Аннотация. *Актуальность* исследования обусловлена деградацией многолетнемерзлых пород под влиянием глобального потепления. Это обуславливает необходимость прогнозной оценки устойчивости мерзлоты для минимизации нарушений инженерных сооружений в криолитозоне. *Цель:* оценка устойчивости мерзлых торфяников в южной части зоны островного распространения мерзлоты. *Объекты:* почвы плоскобугристых и крупнобугристых торфяников, которые сохраняют мерзлоту на южной границе островной криолитозоны. *Методы:* замеры температуры торфа и минерального грунта в наблюдательных геокриологических скважинах на глубинах от 0 до 10 м с применением системы автоматического мониторинга «САМ-Н»; определение температуры поверхности по данным тепловых каналов спутниковых снимков MODIS за 2000–2022 гг.; анализ метеопоказателей и определение трендов температурного режима воздуха для прогнозной оценки устойчивости многолетнемерзлых пород; вычисление индикаторных показателей состояния мерзлоты – суммы положительных и отрицательных температур, коэффициентов морозности воздуха и температурного индекса поверхности. *Результаты.* Отмечены многочисленные признаки неустойчивого состояния мерзлоты: среднегодовая температура поверхностного слоя была положительная во всех обследованных скважинах (+0,8...+1,3 °C); на глубине нулевых теплооборотов (10 м) температура близка к точке таяния (преобладает диапазон –0,2...–0,3 °C), выявлено появление слоя грунта, который не замерзает в течение всего года («несливающаяся мерзлота»). Значения коэффициентов таяния и морозности воздуха соответствуют значениям в области с немерзлыми грунтами. Наблюдаются положительные тренды температуры воздуха, температуры поверхности Земли и высоты снежного покрова. За 2000–2022 гг. приземная температура воздуха в среднем увеличивалась на 0,76 °C/10 лет. Температура поверхности Земли в летний период возрастала в среднем на 0,42 °C/10 лет. При сохранении тенденции к росту температур приземного слоя воздуха мерзлые торфяники в южной части зоны криолитозоны полностью растают через 50–70 лет.

Ключевые слова: многолетнемерзлые породы, островная криолитозона, потепление климата, торфяники, температурный режим, Западная Сибирь

Благодарности: Исследование выполнено при поддержке гранта РНФ 23-27-00366 «Современная динамика мерзлых торфяников на южной границе распространения в Западной Сибири».

Для цитирования: Московченко Д.В., Губарьков А.А., Фахретдинов А.В. Температурный режим торфяников Западной Сибири вблизи южной границы распространения многолетнемерзлых пород // Известия Томского политехнического университета. Инжиниринг георесурсов. – 2024. – Т. 335. – № 9. – С. 160–168. DOI: 10.18799/24131830/2024/9/4456

UDC 631.436:551.34

DOI: 10.18799/24131830/2024/9/4456

Thermal regime of peatlands in Western Siberia near the southern border of the permafrost

D.V. Moskovchenko^{1✉}, A.A. Gubarkov², A.V. Fakhretdinov¹

¹ Tyumen Scientific Center SB RAS, Tyumen, Russian Federation

² Industrial University of Tyumen, Tyumen, Russian Federation

✉ moskovchenko1965@gmail.com

Abstract. Relevance. The permafrost degradation under the effect of global warming. It determines the necessity for a predictive assessment of permafrost stability to minimize disturbances to engineering installations in the permafrost zone. **Aim.** To assess the stability of frozen peatlands in the southern part of the zone of insular distribution of permafrost. **Objects.** Soils of flat-mound and high-mound palsa mires, which preserve permafrost on the southern border of the insular permafrost zone. **Methods.** Measurements of the temperature of peat and mineral soil in geocryological boreholes from 0 to 10 m deep using the SAM-N automatic monitoring surveillance network; determination of surface temperature from thermal channels of MODIS satellite images from 2000 to 2022; analysis of meteorological indices and determination of air temperature trends for predictive assessment of permafrost stability; calculation of indicator values of permafrost state, such as freezing degree-days and thawing degree-days, frost index, freezing and thawing N-factors. **Results.** Numerous features of unstable permafrost have been observed. In particular, the mean annual temperature of the surface layer was positive in all studied boreholes (+0.8...+1.3°C), and the temperature at the depth of zero amplitudes (10 m) is close to the melting point (with the predominance of temperatures in the range of –0.2...–0.3°C). Besides, a layer of soil that does not freeze throughout the year (non-merging permafrost) was identified. The thawing degree-days and frost number values correspond to areas with unfrozen soils. Positive trends in air temperature, Earth's surface temperature, and snow depth were observed. For 2000–2022, surface air temperature increased by 0.76°C/10 years on average. The land surface temperature increased in summer by an average of 0.42°C/10 years. If the positive trend in surface air temperatures continues, frozen peatlands in the southern part of the permafrost zone will completely melt in 50–70 years.

Keywords: permafrost, island cryolithozone, climate warming, peatlands, temperature regime, Western Siberia

Acknowledgements: This research was supported by the Russian Science Foundation, Project no. 23-27-00366 “Contemporary dynamics of permafrost peatlands at the southern boundary of distribution in Western Siberia”.

For citation: Moskovchenko D.V., Gubarkov A.A., Fakhretdinov A.V. Thermal regime of peatlands in Western Siberia near the southern border of the permafrost. Bulletin of the Tomsk Polytechnic University. Geo Assets Engineering, 2024, vol. 335, no. 9, pp. 160–168. DOI: 10.18799/24131830/2024/9/4456

Введение

Одной из наиболее актуальных геоэкологических проблем является деградация многолетне-мерзлых пород (ММП) под влиянием современного потепления климата. В настоящее время температура ММП в полярных и горных районах повышается в среднем на 0,29 °C за 10 лет [1]. Вследствие потепления может нарушиться устойчивость зданий и инженерных сооружений на многолетнемерзлых грунтах, что вызовет огромный экономический ущерб, измеряемый триллионами рублей [2].

Разработка мер по предотвращению ущерба требует прогноза реакции ММП на изменение климата. Точность прогноза зависит от количества и качества исходной информации о температурном режиме грунтов. В научной литературе преобладают оценки и расчеты, но явно недостаточно реаль-

ных наблюдений за деградацией ММП в различных биоклиматических зонах [3]. Особенно важна оценка температурного режима мерзлых пород там, где они наиболее неустойчивы и подвержены климатическим изменениям, – вблизи южной границы распространения. На южной границе островной криолитозоны мерзлота приурочена исключительно к торфяным массивам [4], которые, таким образом, являются своеобразными «хранителями» мерзлоты. Под влиянием потепления климата в настоящее время происходят изменения их морфологии, гидрологии, экологии и биогеохимии [5].

В Западной Сибири сосредоточены крупнейшие торфяные массивы на Земном шаре. В полярных и приполярных районах Западной Сибири торфяники являются одним из преобладающих типов болот и играют большую роль в консервации углерода, ре-

гулировании выбросов парниковых газов, сохранении биоразнообразия и обеспечении стабильности экосистем. Однако сведения о температурном режиме и устойчивости мерзлых торфяников Сибири немногочисленны. В обобщающей оценке современной деградации мерзлоты в Западном секторе Российской Арктики [3] использованы данные только двух площадок мониторинговых геоэкологических наблюдений, расположенных в районе Надыма и Тарко-Сале, а более южные участки остались вне рассмотрения.

С 2019 г. проводится оценка температурного режима торфяников на одном из самых южных участков распространения мерзлоты в Западной Сибири – в районе природного парка Нумто (Ханты-Мансийский автономный округ – Югра, $63^{\circ}10' - 64^{\circ}20'$ с.ш., $70^{\circ}00' - 71^{\circ}35'$ в.д.). Исследуемая территория находится в зоне спорадического и островного распространения ММП, мощность которых не превышает 10–20 м [6]. Отличительной особенностью ландшафтов парка является присутствие здесь бугристых мерзлых торфяников тундрового типа, своеобразного анклава тундровых экосистем в таежной зоне, образующих комплексы площадью до нескольких десятков км² [7]. В 1960–1970-х гг. здесь действовал болотный пост Государственного гидрологического института, исследовавший, в числе прочего, температурный режим и глубину сезонного протаивания мерзлых торфяников [8, 9]. Среди ландшафтов парка Нумто олиготрофные плоско- и крупнобугристые торфяники наиболее неустойчивы к повышению температуры воздуха [10]. В настоящее время здесь отмечена активизация термокарста, в особенности в годы с теплыми и влажными летними сезонами [11]. На мерзлых буграх проявляются различные признаки деградации: пятна оголенного торфа, полигональные трещины-разрывы, термокарстовые просадки, оползневые процессы [12, 13].

Цель работы – оценка устойчивости мерзлых торфяников в южной части зоны островного распространения ММП. Задачи включали в себя: 1) определение температурного режима мерзлых торфяников по данным наблюдений в геоэкологических скважинах и вычисление температуры поверхности с применением данных дистанционного зондирования; 2) выявление трендов изменения температурных показателей; 3) оценка современного состояния сезонно-талого слоя; 4) прогноз изменения ММП под влиянием климатических изменений. Поскольку обследованные торфяники типичны для северной тайги Западной Сибири, оценка их температурного режима и устойчивости может способствовать прогнозированию масштабных изменений ландшафтов, гидрологического режима, биоразнообразия и углеродного баланса.

Материалы и методы

Для определения температурного режима были выбраны участки, различающиеся по морфологическим особенностям торфяников, типу растительности и интенсивности экзогенных процессов. На плоскобугристых торфяниках, крупнобугристых торфяниках и на отдельно стоящих буграх пучения было пробурено девять скважин глубиной 10 м. В скважинах были установлены логгеры – устройства для автоматического измерения, хранения и передачи данных за длительный период времени. Определение температуры грунта проводилось с применением системы автоматического мониторинга «САМ-Н» (ИМКЭС СО РАН, г. Томск) [14]. Погрешность калибровки датчиков не более $\pm 0,1$ °C. Датчики, установленные с шагом 0,5 м до глубины 2 м и далее через 1 м, были запрограммированы на четыре измерения в сутки. В пяти скважинах измерения проводились начиная с 2019 г., в остальных – с 2021 г. В наиболее типичных ландшафтно-геоэкологических условиях – на обширном торфяном массиве, сочетающем плоскобугристые мерзлые торфяники, крупные бугры и немерзлые мочажины, проводилось определение глубины сезонного протаивания на площадке, оборудованной в соответствии с международной методикой циркумполярного мониторинга деятельного слоя CALM [15]. Размеры площадки составляют 100×100 м, расстояние между точками измерения сезонно-талого слоя (СТС) – 10 м. Измерения СТС проведены металлическим щупом диаметром 8 мм, что соответствует ГОСТ 26262-2014 [16].

Поскольку небольшой (2019–2022 гг.) период наблюдений не позволяет достоверно оценить тренд межгодового изменения температуры ММП, для прогноза устойчивости были привлечены: 1) результаты многолетних наблюдений на ближайшей метеостанции Юильск (температура атмосферного воздуха, количество осадков, глубина снежного покрова); 2) результаты определения температуры поверхности Земли (Land Surface Temperature, LST), полученные в процессе обработки тепловых каналов спутниковых снимков MODIS за 2000–2022 гг. [17] Был использован продукт MOD11A1 V6 с пространственным разрешением 1 км, включающий значения по серии восьмидневных временных композитов. LST даёт представление о температуре земной поверхности на границе взаимодействия с атмосферой, включая тепло как от открытой почвы, так и от растительности [18]. Данные о температуре поверхности, полученные с использованием снимков MODIS, коррелируют с данными наземных наблюдений на метеостанциях с коэффициентами корреляции более 0,9 [19], что позволяет использовать этот показатель при оценке климатических изменений.

Для прогноза возможного таяния ММП были подсчитаны климатические параметры и индексы, которые, согласно [20], могут служить маркерами состояния ММП и геокриологических границ: годовые суммы положительных среднесуточных температур воздуха или поверхности почвы (thawing degree-days – TDD); годовые суммы поверхности почвы либо воздуха за период с отрицательными температурами (freezing degree-days, FDD – FDD). Затем был вычислен коэффициент морозности воздуха (Fn) [21].

$$Fn = \frac{\sqrt{|FDD|}}{\sqrt{|FDD|} + \sqrt{TDD}}$$

При расчете индексов суммы отрицательных температур приводятся к положительным значениям. Также был посчитан N-фактор (температурный индекс поверхности) – отношение положительных и отрицательных температур на поверхности почвы к аналогичным суммам температур воздуха за тот же период [22].

Результаты и обсуждение

Результаты измерения температуры грунтов в трех скважинах, характеризующих разные торфяники – плоскобугристые, крупнобугристые и отдельно стоящие бугры пучения представлены в таблице. Среднегодовая температура поверхностного слоя обследованных торфяников была положительная во всех обследованных скважинах и варьировала от +0,8 до +1,3 °С. Мерзлота считается деградирующей, если хотя бы в части разреза (обычно верхней) среднегодовая температура пород стала положительной [23]. Таким образом, от-

меченная различными исследователями активизация экзогенных процессов на обследованном участке – термокарста, оползней, эрозии на берегах озер [11–13], вызвана ростом температуры поверхностного слоя торфяников и переходом ее в положительный диапазон.

Глубина сезонного протаивания на плоскобугристых торфяниках изменялась от 0,4 до 1,0 м. В 1960–1970 гг. глубина сезонного протаивания торфяников в районе оз. Нумто, по данным [8, 9], составляла 0,4–0,6 м. На площадке CALM средняя глубина протаивания варьировала в разные годы от 0,56 до 0,67 м в зависимости от температурного режима воздуха – наименьшее значение отмечено в холодный 2021 г., в теплый 2022 г. наблюдался рост глубины СТС. На крупнобугристых торфяниках и буграх пучения протаивание интенсивнее: кровля ММП залегает на глубинах от 1,0 до 2,0 м. Таким образом, на фоне потепления климата наблюдается тенденция увеличения глубины протаивания.

Особенности теплового режима характеризуют величины N-факторов, максимальные значения которых отмечены на крупнобугристых торфяниках, а минимальные – на плоскобугристых (таблица). Крупные бугры пучения сильнее прогреваются летом, поскольку влагонасыщенность торфа в них меньше по сравнению с плоскими участками, а растительный покров местами деградировал и слабее затеняет поверхность. Вместе с тем они сильнее охлаждаются зимой, поскольку маломощный снежный покров не препятствует промерзанию.

Таблица. Показатели температурного режима бугристых торфяников островной криолитозоны Западной Сибири (природный парк Нумто, 2019–2022 гг.)

Table. Indicators of the temperature regime of palsa mires in the island permafrost zone of Western Siberia (Numto Nature Park, 2019–2022)

Глубина, м Depth, m	Участки и показатели/Sites and indicators							
	1			2			3	
	t cp (mean), °C	Σt>0 °C		t cp (mean), °C	Σt>0 °C		t cp (mean), °C	Σt>0 °C
0	0,8	1609	–1331	1,3	2410	–1929	1,3	1040 –560
0,5	1,1	1215	–853	2,3	1583	–749	–0,4	6 –153
1	1,3	837	–391	–0,3	106	–211	–0,4	0 –144
1,5	0,9	347	–18	–0,3	0	–120	–0,3	0 –96
2	–0,1	0	–29	–0,3	0	–109	–0,2	0 –80
3,0	–0,2	0	–56	–0,3	0	–113	–0,2	0 –75
4,0	–0,2	0	–78	–0,4	0	–130	–0,1	0 –43
5,0	–0,2	0	–81	–0,3	0	–119	–0,1	0 –49
6,0	–0,3	0	–111	–0,3	0	–124	–0,1	0 –35
7,0	–0,3	0	–102	–0,3	0	–127	–0,1	0 –43
8,0	–0,3	0	–123	–0,3	0	–120	–0,1	0 –42
9,0	–0,3	0	–110	–0,4	0	–129	–0,1	0 –46
10,0	–0,3	0	–105	–0,4	0	–134	–0,1	0 –48
N-фактор/T-factor		0,83	0,52	–	1,24	0,75	–	0,54 0,22

1 – бугор пучения/pingo; 2 – крупнобугристый торфяник/high-mound palsa mire; 3 – плоскобугристый торфяник/flat-mound palsa mire.

При анализе температурного режима мерзлоты обычно используют данные о температуре на глубине годовых нулевых амплитуд, где сезонные изменения отсутствуют либо крайне малы ($<0,1\text{ }^{\circ}\text{C}$) [1]. В районе исследований температура ММП на глубине нулевых амплитуд (10 м) изменялась на плоскобугристых торфяниках в пределах $-0,1\ldots-0,4\text{ }^{\circ}\text{C}$, на буграх пучения $-0,2\ldots-0,5\text{ }^{\circ}\text{C}$. Близкие к $0\text{ }^{\circ}\text{C}$ температуры ММП отмечены на низких торфяных грядах, окруженных болотами и озерами. Здесь сказывается отепляющее действие обводненных участков. Средний, наиболее часто встречающийся диапазон температур ($-0,3\ldots-0,2\text{ }^{\circ}\text{C}$) наблюдается на плоскобугристых торфяниках и в бугре пучения с небольшим (0,2–0,3 м) слоем деградирующего торфа на вершине. Наиболее низкая температура ($-0,4\ldots-0,5\text{ }^{\circ}\text{C}$) измерена в скважине, расположенной на многолетнем бугре пучения с мощным (1,6 м) слоем торфа. При этом наиболее низкие значения $-0,5\text{ }^{\circ}\text{C}$ наблюдались редко, преобладали значения $-0,4\text{ }^{\circ}\text{C}$. В аналогичных торфяниках стационара Надым с деградирующей мерзлотой наблюдались близкие температуры: на крупнобугристом торфянике $-0,3\text{ }^{\circ}\text{C}$, в других ландшафтах $-0,2\ldots 0\text{ }^{\circ}\text{C}$ [3].

По данным болотного поста ГГИ, в 1960–1970-х гг. в холодный период года слияние слоя сезонного промерзания с многолетней мерзлотой происходило обычно во второй–третьей декаде января [9]. По нашим наблюдениям, слияние сезонной и многолетней мерзлоты в настоящее время наблюдается не повсеместно, а преимущественно в плоскобугристых комплексах. Распространение ММП несливающегося типа, когда не происходит слияния сезонной и многолетней мерзлоты в холодный период года, является одним из признаков неустойчивого состояния криолитозоны. На обширных массивах плоскобугристых торфяников парка Нумто

мерзлота, как правило, сливающаяся. Промерзание идет значительно быстрее, чем указано в [9]. Переход температур в отрицательный диапазон в профиле плоскобугристых торфяников наблюдался в различные сроки – от первой декады ноября до начала января. Быстрое промерзание, вероятно, связано с относительно низкой влажностью торфа и малым количеством снега в начале зимы. Там, где торфяники чередуются с тальми мочажинами, формируются участки несливающейся мерзлоты. Так, на площадке CALM площадь сливающихся ММП составляет приблизительно одну треть (32–35 %). Образование несливающейся мерзлоты также отмечено на бугре пучения, где кровля ММП опустилась на глубину 2,0 м. Расширение участков с мерзлотой несливающегося типа – характерная реакция торфяников на современные изменения климата [24]. Широкое распространение несливающейся мерзлоты на обследованной территории является очевидным признаком неустойчивого состояния ММП.

Неоднократно отмечено, что современные климатические изменения вызывают рост температуры ММП [1–3]. В зоне островной мерзлоты на глубине нулевых амплитуд температура грунта увеличивается со средней скоростью $0,2\text{ }^{\circ}\text{C}$ за 10 лет [1]. В скважинах температура в период наблюдений (2019–2022) оставалась относительно стабильной, межгодовая изменчивость температуры не превышала $0,1\text{ }^{\circ}\text{C}$ (рис. 1). Причиной варьирования являются погодичные флуктуации температуры воздуха и количества снега. Так, на плоскобугристом торфянике, на котором размещена площадка CALM, в 2022 г., по сравнению с 2020–2021 гг., произошло снижение температуры ММП от $-0,1$ до $-0,2\text{ }^{\circ}\text{C}$, как результат уменьшения высоты снежного покрова.

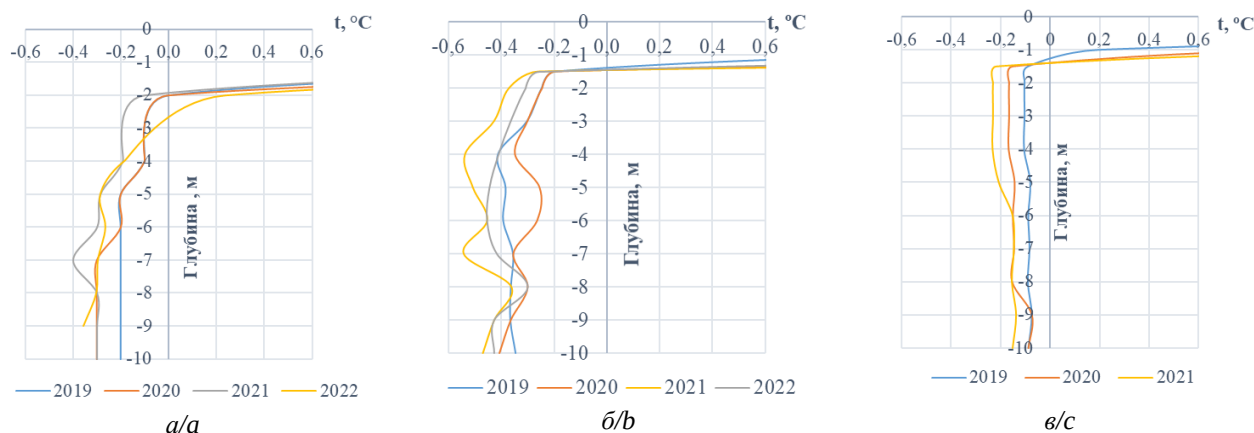


Рис. 1. Температурный режим грунта в скважинах: а) бугор пучения; б) крупнобугристый торфяник; в) плоскобугристый торфяник

Fig. 1. Temperature regime of the soil in boreholes: a) pingo; b) high-mound palsa mire; c) flat-mound palsa mire

Небольшая продолжительность периода наблюдений не дает возможность достоверно определить тренд изменения температуры ММП. Поэтому целесообразно рассмотреть долгосрочные ряды наблюдений за температурой земной поверхности (LST) и приземного слоя атмосферного воздуха. Изменения средней приземной температуры воздуха в местах расположения наблюдательных геокриологических скважин аналогичны изменениям температуры вечной мерзлоты по направлению и порядку величины, поэтому могут быть использованы для прогноза динамики температурного режима ММП [1].

Обработка результатов метеонаблюдений и данных LST показала, что в районе исследований наблюдается устойчивый положительный тренд роста температур воздуха и поверхности грунта. Рост среднегодовой температуры воздуха в 2000–2022 гг. составил $0,76\text{ }^{\circ}\text{C}/10\text{ лет}$. Это значение примерно в 1,5 раза больше, чем средний темп роста температуры воздуха в России, составляющий $0,49\text{ }^{\circ}\text{C}/10\text{ лет}$ [25]. Наблюдается увеличение периода с положительными температурами воздуха. Если в 1970-х гг. он продолжался 135–140 дней – с середины мая до начала октября, то в 2020-х гг. его продолжительность увеличилась до 160–165 дней – с начала мая до середины октября. Температура поверхности возрастала слабее, в среднем на $0,42\text{ }^{\circ}\text{C}/10\text{ лет}$ (рис. 2). Также наблюдается рост количества осадков, в том числе снега. Глубина снежного покрова возрастает со средней интенсивностью $2,5\text{ см}/10\text{ лет}$. Рост глубины снежного покрова является фактором, ослабляющим зимнее промерзание и усиливающим риск деградации ММП [26].

Исследование взаимосвязи климатических показателей и распространения многолетней мерзлоты показало, что южная граница криолитозоны маркируется средними значениями климатических показателей: $\text{TDD} \leq 1353\text{ }^{\circ}\text{C}\cdot\text{сут}$, $\text{FDD} \leq -2442\text{ }^{\circ}\text{C}\cdot\text{сут}$, $\text{Fn} > 0,57$ [19]. Подсчеты аналогичных показателей для района исследований за 2019–2022 гг. выявили следующие значения: $\text{TDD} = 1848\text{ }^{\circ}\text{C}\cdot\text{сут}$, $\text{FDD} = -2547\text{ }^{\circ}\text{C}\cdot\text{сут}$, $\text{Fn} = 0,54$. Таким образом, только коэффициент FDD соответствует климатическим критериям, при которых возможно сохранение мерзлоты. Вероятно, это связано с довольно холодными зимами в условиях континентального климата. Остальные показатели соответствуют показателям территорий, где ММП отсутствуют. Исходя из положительного тренда температуры воздуха, таяние ММП в обследованном районе – только вопрос времени. В особенности интенсивным таяние может быть в годы с многоснежными зимами и высокими температурами воздуха в летний период.

Основываясь на моделировании теплопроводности почвы, М. Смит и Д. Райзборо [27] выявили, что на южной границе криолитозоны мерзлые торфяники сохраняются, если среднегодовая температура воздуха не превышает $+1,5\text{ }^{\circ}\text{C}$. В этом случае поверхностный слой грунта имеет температуру на уровне $0\text{ }^{\circ}\text{C}$. Применение порогового уровня температуры воздуха $+1,5\text{ }^{\circ}\text{C}$ дает простой метод оценки максимальной продолжительности существования ММП под торфяниками при потеплении климата [28]. Простые арифметические подсчеты показывают, что, если тренд роста температур воздуха на последние два десятилетия ($0,76\text{ }^{\circ}\text{C}/10\text{ лет}$) сохранится на прежнем уровне, пороговый уровень $+1,5\text{ }^{\circ}\text{C}$ на обследованной территории будет достигнут приблизительно через 50 лет.

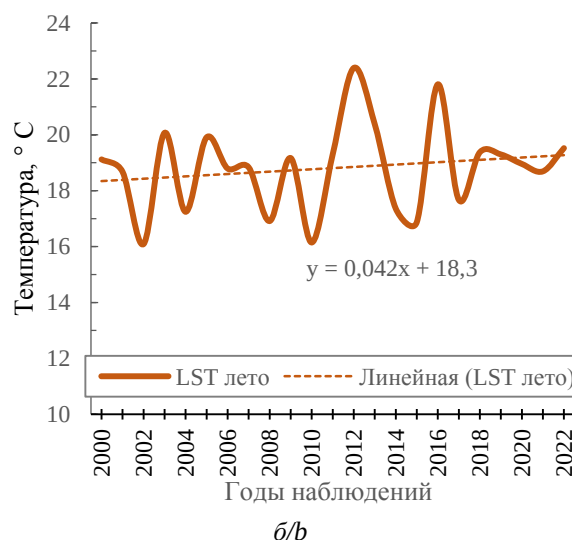
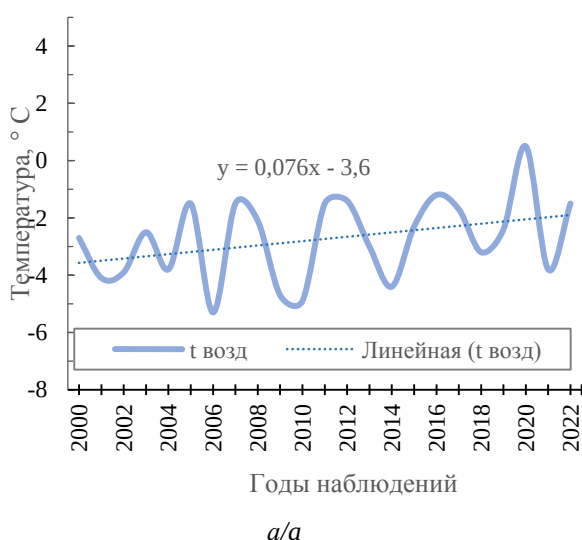


Рис. 2. Среднегодовая температура воздуха (а) и температура поверхности Земли (LST) в летний период (б); 2000–2022 гг.
Fig. 2. Annual air temperature (a) and Land Surface Temperature – LST (b) for the summer period; 2000–2022

При среднем уровне потепления $0,5^{\circ}/10$ лет, типичном для России, период существования обследованных мерзлых торфяников составит около 70 лет. Прогнозное моделирование температуры мерзлых торфяников в районе Надьма также показало, что при сохранении тенденции потепления будет происходить постепенное таяние ММП [29]. Прогнозируемое таяние требует принятия мер для предотвращения негативных последствий, таких как проведение геотехнического мониторинга, искусственное охлаждение оснований и фундаментов инженерных сооружений, внедрение новых методов строительства.

Заключение

Исследование температурного режима грунтов и метеорологических показателей на юге зоны островного распространения ММП в Западной Сибири выявило многочисленные предикторы таяния мерзлоты. Среднегодовая температура поверхностного слоя торфа была положительная во всех обследо-

ванных скважинах ($+0,8...+1,3^{\circ}\text{C}$). Температура торфяников на глубине нулевых теплооборотов близка к 0°C , преобладает диапазон температур от $-0,2$ до $-0,3^{\circ}\text{C}$. Широко распространены ММП нессливающегося типа, то есть в почве сформировался слой, не замерзающий в течение года. Значения коэффициентов протаивания TDD и морозности воздуха F_n соответствуют значениям в области с немерзлыми грунтами. Наблюдаются положительные тренды температуры воздуха, температуры поверхности Земли (LST) и высоты снежного покрова. За 2000–2022 гг. приземная температура воздуха в среднем увеличивалась на $0,76^{\circ}\text{C}/10$ лет. Температура поверхности Земли (LST) в летний период возрастала в среднем на $0,42^{\circ}\text{C}/10$ лет. При сохранении тенденции к росту температур приземного слоя воздуха мерзлые торфяники в южной части зоны островного распространения ММП растают через 50–70 лет.

СПИСОК ЛИТЕРАТУРЫ

1. Permafrost is warming at a global scale / B.K. Biskaborn, S.L. Smith, J. Noetzli et al. // *Nature Communications*. – 2019. – № 10. – 264.
2. Оценка ущерба жилым и промышленным зданиям и сооружениям при изменении температур и оттаивании многолетнемерзлых грунтов в арктической зоне Российской Федерации к середине XXI века / В.П. Мельников, В.И. Осипов, А.В. Брушков, С.В. Багина, Д.С. Дроздов, В.А. Дубровин, М.Н. Железняк, М.Р. Садуртдинов, Д.О. Сергеев, Н.А. Остарков, А.А. Фалалеева, Я.Ю. Шелков. // *Геоэкология. Инженерная геология, гидрогеология, геокриология*. – 2021. – № 1. – С. 14–31.
3. Деградация мерзлоты: результаты многолетнего геокриологического мониторинга в западном секторе Российской Арктики / А.А. Васильев, А.Г. Гравис, А.А. Губарьков, Д.С. Дроздов, Ю.В. Коростелев, Г.В. Малкова, Г.Е. Облогов, О.Е. Пономарева, М.Р. Садуртдинов, И.Д. Стрелецкая, Д.А. Стрелецкий, Е.В. Устинова, Р.С. Широков // *Криосфера Земли*. – 2020. – Т. 24. – № 2. – С. 15–30.
4. Shur Y.L., Jorgenson M.T. Patterns of permafrost formation and degradation in relation to climate and ecosystems // *Permafrost and Periglacial Processes*. – 2007. – Vol. 18. – № 1. – P. 7–19.
5. Permafrost thaw in northern peatlands: rapid changes in ecosystem and landscape functions / D. Olefeldt, L. Heffernan, M.C. Jones, A.B.K. Sannel, C.C. Treat, M.R. Turetsky // *Ecosystem Collapse and Climate Change. Ecological Studies* / Eds. J.G. Canadell, R.B. Jackson. – Cham: Springer, 2021. – Vol. 241. – P. 27–67.
6. Геокриология СССР. Западная Сибирь / под ред. Э.Д. Ершова. – М.: Недра, 1989. – 454 с.
7. Валеева Э.И., Московченко Д.В., Арефьев С.П. Природный комплекс парка «Нумто». – Новосибирск: Наука, 2008. – 280 с.
8. Болота Западной Сибири. Их строение и гидрологический режим / под ред. К.Е. Иванова, С.М. Новикова. – Л.: Гидрометеиздат, 1976. – 447 с.
9. Гидрология заболоченных территорий зоны многолетней мерзлоты Западной Сибири / под ред. С.М. Новикова. – СПб.: ВВМ, 2009. – 536 с.
10. Connecting biodiversity and human dimensions through ecosystem services: The Numto Nature Park in West Siberia Minayeva T.Y., Filippov I.V., Tysiachniouk M.S., Markina A.V., Kiselev S.B., Lapshina E.D., Sirin A.A. // *Ambio*. – 2021. – Vol. 50. – № 2. – P. 2009–2021.
11. Аветов Н.А., Кузнецов О.Л., Шишконокова Е.А. Опыт использования классификации и диагностики почв России в систематике торфяных почв биогеоценозов олиготрофных болот северотасманной подзоны Западной Сибири // *Вестник Московского университета. Серия 17: Почвоведение*. – 2019. – № 4. – С. 37–47.
12. Растительная индикация термокарстовых образований бугристых болот в южной части парка Нумто (Западная Сибирь) / Е.А. Шишконокова, Н.А. Аветов, Т.Ю. Толпышева, А.А. Тарлинская // *Социально-экологические технологии*. – 2019. – № 1. – С. 27–57. DOI: <https://doi.org/10.31862/2500-2961-2019-9-1-27-57>.
13. Проявления регрессивных процессов на болотах южной части природного парка Нумто (Ханты-Мансийский автономный округ – Югра) / Е.А. Шишконокова, Н.А. Аветов, Н.А. Березина, Т.Ю. Толпышева, Н.К. Шведчикова // *Бюллетень Московского общества испытателей природы. Отдел биологический*. – 2016. – Т. 121. – № 3. – С. 39–50.
14. Кураков С.А. Система автономного мониторинга состояния окружающей среды // *Датчики и системы*. – 2012. – № 4. – С. 29–32.
15. Brown J., Hinkel K.M., Nelson F.E. The Circumpolar Active Layer Monitoring (CALM) program: historical perspectives and initial results // *Polar Geography*. – 2000. – Vol. 24. – P. 165–258.
16. ГОСТ 26262-2014. Грунты. Методы полевого определения глубины сезонного оттаивания. – М.: Стандартинформ, 2019. – 7 с.

17. USGS EarthExplorer (2022). URL: <https://earthexplorer.usgs.gov> (дата обращения 16.02.2024).
18. Spatial structure and temporal variability of a surface urban heat island in cold continental climate / I. Esau, V. Miles, M. Varentsov, P. Konstantinov, V. Melnikov // *Theoretical and Applied Climatology*. – 2019. – Vol. 137. – № 12. – P. 2513–2528.
19. Comparison of land skin temperature from a land model, remote sensing, and in situ measurement / A. Wang, M. Barlage, X. Zeng, C.S. Drapert // *Journal of Geophysical Researches: Atmospheres*. – 2014. – Vol. 119. – № 6. – P. 3093–3106.
20. Геоинформационный анализ климатических условий криолитозоны Европейского северо-востока России / Д.А. Каверин, Е.М. Лаптева, В.М. Щанов, А.В. Пастухов, Л.С. Шарая, П.А. Шарый // *Криосфера Земли*. – 2019. – Т. XXIII. – № 4. – С. 68–78.
21. Nelson F.E., Outcalt S.I. A computational method for prediction and regionalization of permafrost // *Arctic, Antarctic and Alpine Researches*. – 1987. – Vol. 19 (3). – P. 279–288.
22. Lunardini V.J. Theory of n-factors and correlation of data // *Proc. 3rd International Conference on Permafrost*. – Edmonton, Alberta, National Research Council of Canada. Ottawa, 1978. – № 1. – P. 40–46.
23. Burn C.R. The thermal regime of cryosols // *Cryosols (Permafrost-affected soils)* / Ed. by J. Kimble. – Berlin, Heidelberg, New York: Springer-Verlag, 2004. – P. 391–414.
24. Особенности современного состояния криогенных ландшафтов Западной Сибири в зоне островного и прерывистого распространения мерзлоты / Д.С. Дроздов, Н.М. Бердников, А.Г. Гравис, А.А. Губарьков, О.Е. Пономарева, А.Г. Скворцов, Е.В. Устинова, А.Г. Царев // *Современные исследования трансформации криосферы и вопросы геотехнической безопасности сооружений в Арктике*. – Салехард, 03–12 ноября 2021. – С. 121–124.
25. Доклад об особенностях климата на территории Российской Федерации за 2020 год. – М.: Государственный гидрологический институт Федеральной службы по гидрометеорологии и мониторингу окружающей среды Российской Федерации, 2021. – 104 с. URL: <http://downloads.igce.ru/reports> (дата обращения 19.10.2023).
26. Вклад климатических факторов в формирование температурных режимов почв прерывистой криолитозоны северной тайги Западной Сибири / О.Ю. Гончарова, Г.В. Матышак, А.А. Бобрик, Д.Г. Петров, М.О. Тархов, М.М. Удовенко // *Бюллетень Почвенного института им. В.В. Докучаева*. – 2017. – № 87. – С. 39–54.
27. Smith M.W., Riseborough D.W. Climate and the limits of permafrost: a zonal analysis. *Permafrost and Periglacial Processes*. – 2002. – Vol. 13. – № 1. – P. 1–15.
28. Camill P. Permafrost thaw accelerates in boreal peatlands during late 20th century climate warming // *Climatic Change*. – 2005. – Vol. 68. – № 1. – P. 135–152.
29. Observations and modelling of ground temperature evolution in the discontinuous permafrost zone in Nady, north-west Siberia / E. Kukkonen, E. Suhonen, E. Ezhova, H. Lappalainen, V. Gennadinik, O. Ponomareva, A. Gravis, V. Miles, M. Kulmala, V. Melnikov, D. Drozdov // *Permafrost and Periglacial Processes*. – 2020. – Vol. 31. – № 2. – P. 264–280.

Информация об авторах

Дмитрий Валерьевич Московченко, доктор географических наук, главный научный сотрудник Института проблем освоения Севера ТюмНЦ СО РАН, Россия, 625026, г. Тюмень, ул. Малыгина, 86. <https://orcid.org/0000-0001-6338-7669>; moskovchenko1965@gmail.com

Анатолий Анатольевич Губарьков, кандидат технических наук, ведущий научный сотрудник Субарктического научно-учебного полигона Тюменского индустриального университета, Россия, 625000, г. Тюмень, ул. Володарского, 38. agubarkov@rambler.ru

Артур Венерович Фахретдинов, младший научный сотрудник Института проблем освоения Севера ТюмНЦ СО РАН, Россия, 625026, г. Тюмень, ул. Малыгина, 86. <https://orcid.org/0000-0002-8975-9771>; arthurfahretdinov@gmail.com

Поступила в редакцию: 01.11.2023

Поступила после рецензирования: 04.12.2023

Принята к публикации: 09.09.2024

REFERENCES

1. Biskaborn B.K., Smith S.L., Noetzli J. Permafrost is warming at a global scale. *Nature Communications*, 2019, no. 10, 264.
2. Melnikov V.P., Osipov V.I., Brouchkov A.V., Badina S.V., Drozdov D.S., Dubrovin V.A., Zheleznyak M.N., Sadurtdinov M.R., Sergeev D.O., Ostarkov N.A., Falaleeva A.A., Shelkov Y.Yu. Damage assessment for residential and industrial buildings and structures due to temperatures change and permafrost thawing in the arctic zone of the Russian Federation by the middle of the XXI century. *Geoekologiya. Inzhenernaya geologiya. Gidrogeologiya. Geokriologiya*, 2021, no. 1, pp. 14–31. (In Russ.)
3. Vasiliev A.A., Gravis A.G., Gubarkov A.A., Drozdov D.S., Korostelev Yu.V., Malkova G.V., Oblogov G.E., Ponomareva O.E., Sadurtdinov M.R., Streletskaya I.D., Streletskiy D.A., Ustinova E.V., Shirokov R.S. Permafrost degradation: results of the long-term geocryological monitoring in the western sector of Russian Arctic. *Earth's Cryosphere*, 2020, vol. 24, no. 2, pp. 15–30. (In Russ.)
4. Shur Y.L., Jorgenson M.T. Patterns of permafrost formation and degradation in relation to climate and ecosystems. *Permafrost and Periglacial Processes*, 2007, vol. 18, no. 1, pp. 7–19.
5. Olefeldt D., Heffernan L., Jones M.C., Sannel A.B.K., Treat C.C., Turetsky M.R. Permafrost thaw in northern peatlands: rapid changes in ecosystem and landscape functions. *Ecosystem Collapse and Climate Change. Ecological Studies*. Eds. J.G. Canadell, R.B. Jackson. Springer, Cham, 2021. Vol. 241, pp. 27–67.
6. *Geocryology of the USSR. Western Siberia*. Ed. by E.D. Ersov. Moscow, Nedra Publ., 1989. 454 p. (In Russ.)

7. Valeeva E.I., Moskovchenko D.V., Arefev S.P. *Natural complex of the Numto Park*. Novosibirsk, Nauka Publ., 2008. 280 p. (In Russ.)
8. *Swamps of Western Siberia. Their structure and hydrological regime*. Eds. K.E. Ivanov, S.M. Novikov. Leningrad, Gidrometeoizdat Publ., 1976. 447 p. (In Russ.)
9. *Hydrology of wetlands in the permafrost zone of Western Siberia*. Ed. by S.M. Novikov. St Petersburg, VVM Publ., 2009. 536 p. (In Russ.)
10. Minayeva T.Y., Filippov I.V., Tysiachniouk M.S., Markina A.V., Kiselev S.B., Lapshina E.D., Sirin A.A. Connecting biodiversity and human dimensions through ecosystem services: The Numto Nature Park in West Siberia. *Ambio*, 2021, vol. 50, no. 2, pp. 2009–2021.
11. Avetov N.A., Kuznetsov O.L., Shishkonakova E.A. Experience in the use of russian soil classification and diagnosis in the systematics of peat soils of oligotrophic bogs in the north taiga subzone of West Siberia. *Moscow University Bulletin. Series 17. Soil Science*, 2019, no. 4, pp. 37–47. (In Russ.)
12. Shishkonankova E.A., Avetov N.A., Tolpysheva T.Yu., Tarlinskaya A.A. Plant indication of thermocarst forms in palsa mires in the south of nature park Numto (West Siberia). *Socialno-ecologicheskie Tekhnologii*, 2019, no. 1, pp. 27–57. (In Russ.)
13. Shishkonakova E.A., Avetov N.A., Berezina N.A., Tolpysheva T.Yu., Shvedchikova N.K. Manifestation of regressive processes in mires of south part of Numto nature park (Khanty-Mansi Autonomous okrug – Yugra). *Bulletin of Moscow Society of naturalists. Biological Series*, 2016, vol. 121, no. 3, pp. 39–50. (In Russ.)
14. Kurakov S.A. Environmental condition autonomous monitoring system. *Datchiki & Systemi (Sensors & Systems)*, 2012, no. 4, pp. 29–32. (In Russ.)
15. Brown J., Hinkel K.M., Nelson F.E. The Circumpolar Active Layer Monitoring (CALM) program: historical perspectives and initial results. *Polar Geography*, 2000, vol. 24, pp. 165–258.
16. SS 26262-2014. *Soils. Methods for field determination of the depth of seasonal thawing*. Moscow, Standartinform Publ., 2019. 7 p.
17. *USGS EarthExplorer* (2022). Available at: <https://earthexplorer.usgs.gov> (accessed 16 February 2024).
18. Esau I., Miles V., Varentsov M., Konstantinov P., Melnikov V. Spatial structure and temporal variability of a surface urban heat island in cold continental climate. *Theoretical and Applied Climatology*, 2019, vol. 137, no. 12, pp. 2513–2528.
19. Wang A., Barlage M., Zeng X., Drapert C.S. Comparison of land skin temperature from a land model, remote sensing, and in situ measurement. *Journal of Geophysical Researches: Atmospheres*, 2014, vol. 119, no. 6, pp. 3093–3106.
20. Kaverin D.A., Lapteva E.M., Shchanov V.M., Pastukhov A.V., Sharaya L.S., Shary P.A. Climatic geoinformation analysis of the cryolithozone in the northeast of European Russia. *Earth's Cryosphere*, 2019, vol. 23, no. 4, pp. 68–78. (In Russ.)
21. Nelson F.E., Outcalt S.I. A computational method for prediction and regionalization of permafrost. *Arctic, Antarctic and Alpine Researches*, 1987, vol. 19, no. 3, pp. 279–288.
22. Lunardini V.J. Theory of n-factors and correlation of data. *Proc. of the 3rd International Conference on Permafrost*. Edmonton, Alberta, National Research Council of Canada, Ottawa, 1978. No. 1, pp. 40–46.
23. Burn C.R. The thermal regime of cryosols. *Cryosols (Permafrost-affected soils)*. Ed. by J. Kimble. Berlin, Heidelberg, New York, Springer-Verlag, 2004. pp. 391–414.
24. Drozdov D.S., Berdnikov N.M., Gravis A.G., Gubarkov A.A., Ponomareva O.E., Skvortsov A.G., Ustinova E.V., Tsarev A.M. Features of the current state of cryogenic landscapes of Western Siberia in the zone of insular and intermittent permafrost distribution. *Modern research into the transformation of the cryosphere and issues of geotechnical safety of structures in the Arctic. Proc. of the Conference*. Salekhard, 2021. pp. 121–124. (In Russ.)
25. *Report on climate features on the territory of the Russian Federation in 2022*. Moscow, 2023. (In Russ.) Available at: <http://downloads.igce.ru/reports> (accessed 19 October 2023).
26. Goncharova O.Yu., Matyshak G.V., Bobrik A.A., Petrov D.G., Tarhov M.O., Udovenko M.M. The input of the climatic factors in the temperature regime of soils of discontinuous permafrost of northern taiga of Western Siberia. *Byulleten Pochvennogo instituta im. V.V. Dokuchaeva*, 2017, vol. 87, pp. 39–54. (In Russ.)
27. Smith M.W., Riseborough D.W. Climate and the limits of permafrost: a zonal analysis. *Permafrost and Periglacial Processes*, 2002, vol. 13, no. 1, pp. 1–15.
28. Camill P. Permafrost thaw accelerates in boreal peatlands during late-20th century climate warming. *Climatic Change*, 2005, vol. 68, no. 1, pp. 135–152.
29. Kukkonen E., Suhonen E., Ezhova E., Lappalainen H., Gennadinik V., Ponomareva O., Gravis A., Miles V., Kulmala M., Melnikov V., Drozdov D. Observations and modelling of ground temperature evolution in the discontinuous permafrost zone in Nadyem, north-west Siberia. *Permafrost and Periglacial Processes*, 2020, vol. 31, no. 2, pp. 264–280.

Information about the authors

Dmitrii V. Moskovchenko, Dr. Sc., Principal Researcher, Tyumen Scientific Center SB RAS, 86, Malygin street, Tyumen, 625026, Russian Federation. <https://orcid.org/0000-0001-6338-7669>; moskovchenko1965@gmail.com
Anatoly A. Gubarkov, Cand. Sc., Senior Researcher, Industrial University of Tyumen, 38, Volodarsky street, Tyumen, 625000, Russian Federation. agubarkov@rambler.ru
Artur V. Fakhretdinov, Junior Researcher, Tyumen Scientific Center SB RAS, 86, Malygin street, Tyumen, 625026, Russian Federation. <https://orcid.org/0000-0002-8975-9771>; arthurfahretdinov@gmail.com

Received: 01.11.2023

Revised: 04.12.2023

Accepted: 09.09.2024

УДК 622.692.4.053

DOI: 10.18799/24131830/2024/9/4435

Шифр специальности ВАК: 25.00.19

Применение противотурбулентных присадок в качестве способа уменьшения тепловых потерь при перекачке по трубопроводу

Т. Банерджи✉, Р.А. Шестаков

*Российский государственный университет нефти и газа
(национальный исследовательский университет) имени И.М. Губкина, Россия, г. Москва*

✉tanoyabaner@mail.ru

Аннотация. *Актуальность* исследования обусловлена необходимостью поддержания температурного режима перекачки продукта при постоянно усложняющихся условиях пролегания трасс трубопроводов путем уменьшения тепловых потерь нефте- и нефтепродуктопроводов, а также расширения области применения противотурбулентных присадок. *Цель:* определить влияние применения противотурбулентных присадок на тепловые и гидравлические потери в трубопроводе и предложить экономически выгодные способы использования присадок при перекачке по трубопроводам. *Объекты:* тепловые и гидравлические потери в трубопроводах, перекачивающих нефть и нефтепродукты. *Метод:* математический анализ влияния применения противотурбулентных присадок на теплогидравлические свойства потока для оценки перспективы повышения энергоэффективности перекачки жидкости по трубопроводам путем ввода полимерных добавок. *Результаты.* Проведен расчет температуры потока с использованием противотурбулентной присадки в зависимости от ее концентрации и эффективности с учетом изменения свойств перекачиваемого продукта от температуры. Построены графические зависимости экономических составляющих тепловых и гидравлических потерь от концентрации противотурбулентных присадок. Подсчитана экономическая целесообразность принятого решения в части вычисления разницы стоимости перекачки с и без противотурбулентных присадок. Выявлено соотношение влияния потерь от трения и от теплообмена с окружающей средой на тепловые потери, а также проанализировано изменение данных параметров после ввода противотурбулентных присадок. Для рассматриваемого трубопровода, параметры которого соответствуют стандартным параметрам перекачки, сделаны выводы о превалировании вклада гидравлической эффективности присадки над тепловой, что свидетельствует о целесообразности применения противотурбулентных присадок в качестве агента снижения тепловых потерь при больших значениях эффективности полимерной добавки, однако общая экономическая эффективность максимальна при меньших концентрациях агента. Построен плоскостной график, отражающий зависимость температуры в конце участка трубопровода от двух координат: длины участка и эффективности введенной присадки.

Ключевые слова: полимерная присадка, гидравлическое сопротивление, снижение теплоотдачи, тепловая энергоэффективность противотурбулентных присадок, экономическая целесообразность

Благодарности: Авторы благодарят Владимира Васильевича Жолобова за внимательную проработку статьи и замечания, способствующие улучшению понимания и аргументации выводов.

Для цитирования: Банерджи Т., Шестаков Р.А. Применение противотурбулентных присадок в качестве способа уменьшения тепловых потерь при перекачке по трубопроводу // Известия Томского политехнического университета. Инжиниринг георесурсов. – 2024. – Т. 335. – № 9. – С. 169–182. DOI: 10.18799/24131830/2024/9/4435

UDC 622.692.4.053

DOI: 10.18799/24131830/2024/9/4435

Application of drag reduction agents as a method for reducing heat loss during pumping through a pipeline

T. Banerjee✉, R.A. Shestakov

National University of Oil and Gas «Gubkin University», Moscow, Russian Federation

✉tanoyabaner@mail.ru

Abstract. Relevance. The need to maintain the temperature regime of product pumping under increasingly complex conditions of pipeline routes by reducing heat losses of oil and petroleum product pipelines, as well as expanding the scope of application of anti-turbulence additives. **Aim.** To determine the effect of anti-turbulence additives on heat and hydraulic losses in the pipeline and to propose cost-effective ways to use additives when pumping through pipelines. **Objects.** Heat and hydraulic losses in pipelines pumping oil and oil products. **Methods.** Mathematical analysis of the influence of anti-turbulence additives on the thermohydraulic properties of the flow to assess the prospects for increasing the energy efficiency of pumping liquid through pipelines by introducing polymer additives. **Results.** The flow temperature was calculated using anti-turbulence additive depending on its concentration and efficiency, taking into account the dependence of the properties of the pumped product on temperature. The authors have constructed the graphic dependences of the economic components of heat and hydraulic losses on the concentration of anti-turbulence additives. The economic feasibility of the decision was estimated in terms of calculating the difference in pumping costs with and without anti-turbulence additives. The authors identified the relationship between the impact of losses from friction heat and heat exchange with the environment on heat losses, and analyzed the change in these parameters after the introduction of anti-turbulence additives. For the pipeline under consideration, the parameters of which correspond to standard pumping ones, the conclusions were drawn on the predominance of the contribution of the additive hydraulic efficiency over the thermal one. This indicates the advisability of using an anti-turbulence additive as an agent for reducing heat losses at high values of the efficiency of the polymer additive, however, the overall economic efficiency is maximum at lower concentrations of the agent. The authors constructed a planar graph reflecting the dependence of the temperature at the end of the pipeline section on two coordinates: the length of the section and the hydraulic efficiency of the introduced additive.

Keywords: polymer additive, hydraulic resistance, heat transfer reduction, thermal energy efficiency of anti-turbulent additives, economic feasibility

Acknowledgements: The authors appreciate Vladimir V. Zholobov for detailed paper study and commentaries contributing to better comprehension and reasoning of conclusions.

For citation: Banerjee T., Shestakov R.A. Application of drag reduction agents as a method for reducing heat loss during pumping through a pipeline. *Bulletin of the Tomsk Polytechnic University. Geo Assets Engineering*, 2024, vol. 335, no. 9, pp. 169–182. DOI: 10.18799/24131830/2024/9/4435

Введение

Тепловые потери являются серьезной проблемой при перекачке жидкостей по трубопроводу. Они могут привести к неэффективному использованию энергии, повышенным затратам на обогрев перекачиваемого продукта, его застыванию, остановке перекачки и к другим негативным последствиям. Возникает потребность в разработке методов и технологий, позволяющих снизить тепловые потери и повысить энергоэффективность перекачки по трубопроводу. Существуют традиционные методы сохранения тепла – использование мощности нагревательных печей для поднятия температуры продукта, применение теплоизоляционных материалов и нагревательных кабелей для поддержания необходимой температуры и уменьшения тепловых потерь [1–3]. Постоянно усложняющиеся условия прокладки и эксплуатации трубопроводов требуют совершенствования существующих методов сохранения тепла продукта. В рамках данной работы проведена оценка степени влияния противотурбулентных присадок (ПТП) на гидравлические и тепловые потери в трубопроводе. Проблематика предполагает рассмотрение эффекта введения ПТП на тепловые потери в трубопроводе, в части влияния на коэффициент теплоотдачи от перекачиваемого продукта к внутренней поверхности стенки трубы, а также на тепловые потери на трение (диссипацию энергии).

ПТП вносят изменения в гидродинамические параметры потока, такие как турбулентность, смешение и профиль скорости [4–8]. Причем присадки настолько универсальны, что могут применяться не только при перекачке по магистральному трубопроводу, но и для повышения пропускной способности промышленных трубопроводов [9] и даже для нелинейной части – например, при добыче углеводородного сырья с помощью гидроразрыва пласта [10]. Исследования показывают, что применение присадок может уменьшить потери энергии на трение, улучшить равномерность распределения скорости и снизить образование вихрей и турбулентных структур в различных углеводородных средах [11, 12], что приводит к более энергоэффективному перемещению жидкости по трубопроводу. В настоящий момент происходит активное изучение агентов снижения гидравлического сопротивления, например, оценивают различные биовещества, способные вызывать эффект Томса [13].

Турбулентный поток имеет пристеночный ламинарный слой. При вводе в перекачиваемую среду ПТП действуют преимущественно в пристенной области, делая ламинарный подслои более широким. Меняются теплофизические свойства жидкости, которые влияют на общую теплопередачу и, соответственно, тепловые потери в трубопроводе. Утолщенный ламинарный подслои имеет большее

термическое сопротивление и способствует снижению интенсивности теплопередачи [14]. Влияние ПТП на теплообменные процессы в трубопроводе рассматривается в работах [15–18]. Известно, что полимерные добавки используются даже в системе охлаждения двигателей ДВС [19].

Инородные тела в трубопроводе, в частности газозвушнные скопления или асфальтосмолопарафиновые отложения (АСПО), также вносят вклад в общий процесс теплопередачи. Газозвушнные скопления расположены локально на участках с переходом высот, в отличие от условно равномерно распределенных АСПО, которые представляют собой слой отложений, снижающих тепловые потери при транспортировке [20].

Кроме эффекта утолщения ламинарного подслоя, сокращение турбулентных вихрей и пульсаций также приводит к уменьшению тепловых потерь в радиальном направлении [21, 22]. В работе [23] описан эксперимент, который приводит к увеличению тепловых потерь при усилении вихрей в пристеночной зоне.

Материалы и методы

Рассмотрение ПТП в качестве альтернативного способа минимизации тепловых потерь является перспективным направлением, нуждающимся в дальнейшем экспериментальном исследовании, т. к. не всегда представляется возможным осуществлять регулировку температурного режима с помощью традиционных способов (изменения мощности тепловых печей или электрического кабеля). Осложнения возникают, например, при изменении влажности грунта после выпадения осадков или вследствие паводков, что приводит к увеличению теплоотдачи в системе «трубопровод–грунт» от перекачиваемого продукта в окружающую среду [21]. Более того, применение тепловой изоляции не всегда представляется возможным ввиду особенностей прокладки и монтажа трубопровода, например, в шельфовых условиях.

В рамках данного исследования проведен оценочный расчет трубопровода с целью сопоставления вклада ПТП в повышение гидравлической эффективности нефтеперекачивающей станции и тепловой эффективности тепловой станции (на примере пунктов электроподогрева). Расчет проведен с учетом изменения реологических свойств продукта при неизотермической перекачке при средней температуре продукта.

Кинематическая вязкость вычислена по формуле Рейнольдса–Филонова (1):

$$\vartheta = \vartheta_0 \cdot e^{-k \cdot (T - T_0)}, \quad (7)$$

где ϑ_0 – вязкость нефти или нефтепродукта при температуре T_0 ; k – постоянные коэффициенты для конкретной углеводородной жидкости; T – темпе-

ратура, при которой необходимо определить удельную теплоемкость продукта, K .

Удельная теплоемкость продукта c_p определяется по формуле Кrego (2):

$$c_p = \frac{31,56}{\sqrt{\rho_{20}}} \cdot (762 + 3,39 \cdot T), \quad (8)$$

где ρ_{20} – плотность продукта при 20 °С, К.

Теплопроводность продукта определяется по формуле Кrego–Смита (3):

$$\lambda' = \frac{156,6}{\rho_{20}} \cdot (1 - 0,00047 \cdot T). \quad (9)$$

В настоящее время предприняты попытки моделирования теплообменных процессов в неизотермических трубопроводах с учетом влияния ПТП на перекачку [24], в том числе и для неьютоновских тяжелых нефтей [25]. Однако не существует утвержденной и апробированной методики, позволяющей оценить количество ПТП, необходимое для экономически целесообразного снижения тепловых потерь при перекачке по трубопроводу. В настоящей работе для оценки использованы методики из работы [26], в которой авторы получили зависимости температуры раствора (т. е. продукта с присадкой) от параметров чистого растворителя (т. е. чистого продукта).

Зависимость температуры в конце участка трубопровода T_s (T_p при вводе ПТП) от эффективности присадки представляется возможным вычислить по формуле Шухова с поправкой Лейбензона, уточненной коэффициентом нагрева от трения k_λ [27] (формула (4)):

$$T_s = T_0 + (T_{гр} - T_0) \cdot e^{-\text{Шу}} + k_\lambda \cdot b \cdot (1 - e^{-\text{Шу}}), \quad (10)$$

где T_s – температура в конце участка трубопровода, К; T_0 – температура в начале участка трубопровода, К; $T_{гр}$ – температура грунта, К; Шу – число Шухова, вычисляемое по формуле (5):

$$\text{Шу} = \frac{\pi \cdot d \cdot K \cdot L}{G \cdot c_p}, \quad (5)$$

где K – коэффициент теплопередачи, зависящий от концентрации ПТП, Вт/(м²·К); d – внутренний диаметр трубопровода, м; G – массовый расход продукта, кг/с; c_p – удельная теплоемкость продукта, Дж/(кг·К); k_λ – коэффициент нагрева от трения, зависящий от эффективности ПТП и вычисляемый по формуле (6):

$$k_\lambda = \frac{1}{\frac{\alpha}{K} + 1}, \quad (6)$$

где α – коэффициент теплоотдачи от продукта к внутренней поверхности стенки трубы, зависящий от эффективности ПТП, Вт/(м²·К); b – поправка на тепло трения, зависящая от концентрации ПТП, К, и вычисляемая по формуле (7):

$$b = \frac{Q \cdot \rho \cdot g \cdot i}{\pi \cdot d \cdot K}, \quad (7)$$

где Q – производительность трубопровода, м³/с; ρ – плотность продукта, кг/м³; i – гидравлический уклон трубопровода, вычисленный по формуле (8):

$$i = \lambda \cdot \frac{v^2}{2 \cdot d \cdot g}, \quad (8)$$

где v – скорость перекачиваемого продукта, м/с; λ – коэффициент гидравлического сопротивления растворителя, вычисленный в настоящей работе по формуле Альтшуля при средней температуре потока по формуле (9):

$$\lambda = 0,11 \left(\frac{68}{Re} + \frac{\Delta}{d} \right), \quad (9)$$

где Re – число Рейнольдса, которое, как известно, зависит от вязкости, изменяющейся в зависимости от температуры, что учтено в формуле (1); Δ – абсолютная шероховатость стенки трубы, мм.

При этом после добавления ПТП коэффициент гидравлического сопротивления раствора λ_p уменьшается (раствором является перекачиваемый продукт с присадкой, параметры которого выражаются переменными с индексом p), по сравнению с коэффициентом гидравлического сопротивления чистого растворителя λ_s (растворителем является продукт без присадки, параметры которого выражаются переменными с индексом s), и вычисляется по формуле (10):

$$\lambda_p = \lambda_s \cdot (1 - \psi), \quad (10)$$

где ψ – величина снижения гидравлического сопротивления трубопровода, или эффективность ПТП.

Эффективность присадки, которая характеризует степень снижения гидравлического сопротивления, в работе [28] предложено аппроксимировать в виде формулы (11):

$$\psi = \frac{\theta}{b_0 + \theta \cdot b_1} k(Re), \quad (11)$$

где b_0 и b_1 – коэффициенты аппроксимации, способ определения которых описан в работе [29]; $k(Re)$ – поправочный коэффициент на степень развитости турбулентности потока в трубопроводе [30], вычисляемый по формуле (12):

$$k(Re) = \frac{Re}{Re + 2800}. \quad (12)$$

Для оценочных расчетов примем коэффициенты аппроксимации кривой эффективности ПТП из работы [31] $b_0 = 6,87 \cdot 10^{-6}$, $b_1 = 1,96$.

Связь коэффициента теплопередачи раствора K_p от параметров чистого растворителя выражается формулой (13) [26]:

$$\frac{1}{K_p} = \frac{1}{K_s} + \frac{\psi}{\alpha_s \cdot (1 - \psi)}. \quad (13)$$

Коэффициент теплопередачи K связан с коэффициентами теплоотдачи от продукта к стенке трубы α и от стенки трубы к грунту α_2 , а также с термическим сопротивлением стенки трубы по формуле (14):

$$K = \frac{1}{\frac{1}{\alpha \cdot d} + \frac{1}{2 \cdot \lambda'} \ln\left(\frac{D}{d}\right) + \frac{1}{\alpha_2 \cdot D}}, \quad (14)$$

где D – наружный диаметр трубопровода, м; λ' – теплопроводность материала трубы, Вт/(м·К); α_2 – коэффициент теплоотдачи от трубы к грунту, Вт/(м²·К).

По формуле (14) представляется возможным решить «обратную» задачу и, зная коэффициент теплопередачи после ввода ПТП из формулы (13), вычислить коэффициент теплоотдачи от перекачиваемого продукта к стенке трубы α по формуле (15):

$$\alpha = \frac{1}{d \cdot \left(\frac{1}{K} - \frac{1}{2 \cdot \lambda'} \ln\left(\frac{D}{d}\right) - \frac{1}{\alpha_2 \cdot D} \right)}. \quad (15)$$

Показатель экономической целесообразности принятого решения в части «тепловой» выгоды представляется возможным вычислить с помощью следующей формулы (16) [18]:

$$S_T = Q \cdot \rho \cdot \frac{c_p \cdot (T_p - T_s) \cdot \sigma_T}{\eta_T}, \quad (16)$$

где σ_T – стоимость энергии на подогрев нефти, р./Дж; η_T – КПД нагревательной печи.

Для анализа и дальнейшей оценки целесообразности рассчитать степени влияния тепловой и гидравлической эффективности ПТП. Экономия затрат на потери напора в трубопроводе после ввода ПТП оценивают по формуле (17):

$$S_M = Q \cdot \rho \cdot \frac{g \cdot \Delta h \cdot \sigma_M}{\eta_M}, \quad (17)$$

где Δh – разница потерь напора при использовании ПТП и без, м; σ_M – стоимость механической энергии, р./Дж; η_M – механический КПД.

Затраты на стоимость присадки представляется возможным вычислить по формуле (18):

$$S_{\Pi} = Q \cdot \rho \cdot \theta \cdot \sigma_{\Pi}, \quad (18)$$

где θ – концентрация ПТП; σ_{Π} – стоимость ПТП.

Изменение внутренней энергии несжимаемой или слабосжимаемой жидкости, которой и является нефть (нефтепродукт), определяется теплообменом с окружающей средой и выделением тепла за счет сил внутреннего трения, что представлено в уравнении притока тепла (формула (19)) [32]:

$$\rho \cdot \frac{de_{\text{внут}}}{dt} \cong \frac{4}{d} \cdot q_n + \lambda \cdot \frac{\rho \cdot v^3}{2 \cdot d}, \quad (19)$$

где $e_{\text{внут}}$ – удельная внутренняя энергия, Дж/кг; q_n – плотность теплового потока, Вт/м², вычисляемая по формуле (20):

$$q_n = -K \cdot \pi \cdot (T - T_{гр}), \quad (20)$$

где T – средняя температура потока в трубопроводе, К.

Таким образом, скорость изменения внутренней энергии определяется теплообменом с окружающей средой (первое слагаемое правой части формулы (19)) и выделением тепла за счет сил внутреннего трения (второе слагаемое правой части формулы (19)).

Результаты исследования

Проанализируем возможность применения ПТП на моделируемом участке трубопровода. Параметры рассматриваемого объекта представлены в табл. 1.

Таблица 1. Параметры трубопровода и перекачиваемого продукта

Table 1. Pipeline and product parameters

Наименование параметра Parameter	Значение Value	Размерность Dimension
Температура в начале участка Temperature at the beginning of the section	47	°C
Температура грунта/Ground temperature	8	°C
Производительность Flow rate	0,5	м³/с m³/s
Наружный диаметр трубопровода Pipeline outside diameter	0,72	м/м
Внутренний диаметр трубопровода Pipeline inside diameter	0,696	м/м
Длина участка/Section length	150·10³	м/м
Шероховатость стенки трубы Pipe wall roughness	0,1	мм/мм
Плотность при 20 °C Density at 20°C	850	кг/м³ kg/m³
Теплоемкость продукта Heat capacity of the product	2000	Дж/(кг·К) J/(kg·K)
Коэффициент теплоотдачи от трубопровода к грунту Heat transfer coefficient from pipeline to ground	7	Вт/(м²·К) W/(m²·K)
Теплопроводность трубы Pipe thermal conductivity	50	Вт/(м·К) W/(m·K)
Теплопроводность продукта Product thermal conductivity	0,2	Вт/(м·К) W/(m·K)
Температурная поправка на плотность Temperature correction for density	12,25·10⁻⁴	1/°C
Кинематическая вязкость продукта при 20 °C Product kinematic viscosity at 20°C	14,22	сСт sSt
Кинематическая вязкость продукта при 50 °C Product kinematic viscosity at 50°C	5,9	сСт sSt
Стоимость энергии на подогрев нефти [18] Cost of energy to heat oil [18]	1,67·10⁻⁷	р./Дж rub/J
КПД тепловой печи Heating furnace efficiency	0,6	—
Стоимость механической энергии (на привод насосов) [18] Cost of mechanical energy (to drive pumps) [18]	9,72·10⁻⁷	р./Дж rub/J
Механический КПД/Mechanical efficiency	0,8	—
Стоимость присадки Additive cost	400	р./кг rub/kg

Расчет проведен с учетом изменения реологических свойств продукта при неизотермической перекачке при помощи метода итераций (так как некоторые переменные в уравнении Шухова зависят от температуры потока). Результаты расчета при перекачке без ввода ПТП приведены в табл. 2.

Таблица 2. Результаты теплового расчета трубопровода без ввода ПТП

Table 2. Results of thermal calculation of the pipeline without adding drag reduction agent (DRA)

Наименование параметра Parameter	Значение Value	Размерность Dimension
Температура в конце участка Temperature at the end of the section, T_s	313,26	К
Число Шу/Shukhov number	0,2117	—
Коэффициент теплопередачи Overall heat transfer coefficient, K	0,54510	Вт/(м²·К) W/(m²·K)
Коэффициент теплоотдачи от потока к стенке, α_1 Heat transfer coefficient from flow to wall, α_1	0,8783	Вт/(м²·К) W/(m²·K)
Число Нуссельта в теплоотдаче от нефти к стенке трубы при вынужденной конвекции Nusselt number in heat transfer from oil to the pipe wall during forced convection, Nu	3,90	—
Число Рейнольдса/Reynolds number, Re	128971	—
Коэффициент гидравлического сопротивления Hydraulic resistance coefficient	0,01770	—
Плотность/Density	849,64	кг/м³ kg/m³
Число Прандтля/Prandtl number	76,40	—
Кинематическая вязкость Kinematic viscosity	7,10	сСт/sSt
Динамическая вязкость/Dynamic viscosity	0,006029	Па·с/Pa·s
Удельная теплоемкость продукта Specific heat capacity of the product	1987,07	Дж/(кг·К) J/(kg·K)
Коэффициент теплопроводности продукта Product thermal conductivity coefficient	0,16	Вт/(м·К) W/(m·K)
Коэффициент нагрева от трения, k_t Friction heat coefficient, k_t	0,38294	—
Поправка на тепло трения, b Friction heat correction, b	7,5797	К

Зная коэффициент гидравлического сопротивления чистого продукта, вычисленный при средней температуре, вычислим по формуле (8) гидравлический уклон трубопровода – 1,53 м/км. Затем представляется возможным провести расчет температуры продукта в конце участка трубопровода с учетом влияния ПТП на теплообмен в соответствии с формулами (4)–(7). Необходимо отметить, что при расчете учитывалось влияние температуры на характеристики продукта по формулам (1)–(3).

Для примера рассчитаем температуру в конце участка для концентрации $\theta=5$ ppm. Эффективность ПТП при данной концентрации для числа Рейнольдса $Re=124797$ по формулам (11) и (12)

равна 0,293 и 29,3 %. Определим коэффициент теплопередачи после ввода присадки по формуле (13):

$$K_p = \frac{1}{\frac{1}{0,5451} + \frac{0,293}{0,828 \cdot (1 - 0,293)}} = 0,43334 \left(\frac{\text{Вт}}{\text{м}^2 \cdot \text{К}} \right).$$

По формуле (15) представляется возможным вычислить коэффициент теплоотдачи от перекачиваемого продукта к стенке трубы α . На данном этапе речь идет о растворе, поэтому коэффициент теплоотдачи от раствора (продукта с ПТП) к стенке трубы обозначается, как α_p :

$$\alpha_p = \frac{1}{0,696 \cdot \left(\frac{1}{0,43334} - \frac{1}{2 \cdot 50} \ln \left(\frac{0,720}{0,696} \right) - \frac{1}{7 \cdot 0,720} \right)} = 0,68130 \left(\frac{\text{Вт}}{\text{м} \cdot \text{К}} \right).$$

С новыми значениями коэффициента теплопередачи представляется возможным пересчитать температуру в конце участка по формуле Шухова (4).

Для наглядности рассмотрим модель расчета, который проведен в рамках настоящей работы

(рис. 1). Звездочками обозначены параметры, подсчитанные при средней температуре внутренней поверхности стенки трубы.

Параметры, входящие в среднюю температуру потока (вычисляется как среднее арифметическое температур в начале и конце участка), сами зависят от средней температуры потока, поэтому для расчета применялся метод итераций. Итерируемые параметры выделены на рис. 1 фиолетовым цветом. При этом после добавления присадки меняется коэффициент теплопередачи (формула (13)) и гидравлический уклон трубопровода (формула (8)). Не допустимо в новом расчете температуры с присадкой применять значения остальных параметров прежними, так как они зависят от температуры потока, следовательно, повторно использовался метод итераций.

Результаты теплового расчета трубопровода с различными концентрациями ПТП представлены в табл. 3. Необходимо отметить, что для расчета использовалась теоретическая модель присадки с высокими значениями эффективности, которые на практике определяются эмпирическим путем для конкретной углеводородной жидкости.

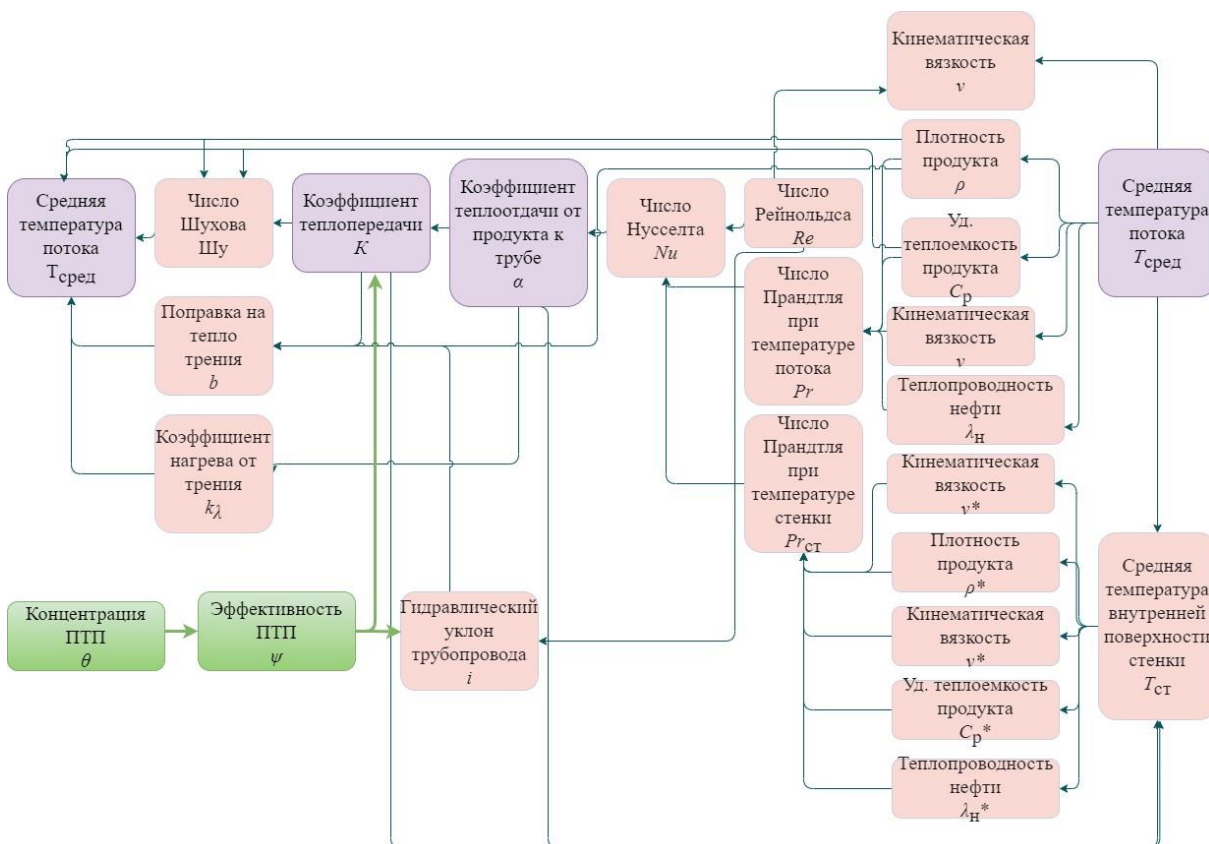


Рис. 1. Модель расчета температуры потока от концентрации присадки

Fig. 1. Model for calculating flow temperature depending on additive concentration

Таблица 3. Результаты теплового расчета трубопровода с ПТП

Table 3. Results of thermal calculation of a pipeline with DRA

Концентрация/Concentration, ppm	0	5	10	25
Эффективность/Efficiency, %	0	29	37	44
Температура в конце участка Temperature at the end of the section, K	313,26	314,52	314,92	315,30

Чем выше концентрация присадки (и, соответственно, эффективность), тем больше разница температур T_p и T_s , что свидетельствует о прямой зависимости между концентрацией присадки и уменьшением тепловых потерь в трубопроводе.

По формуле (13) для различных значений эффективности ПТП рассчитаны соответствующие коэффициенты теплопередачи по формуле (13), с использованием которых по формуле (4) вычислены температуры в конце участка для каждого значения концентрации присадки до 25 ppm. Зная неизменную температуру в начале участка трубопровода и температуры в конце участка при различных концентрациях присадки, представляется возможным вычислить среднюю температуру потока, как среднее арифметическое двух температур – начала и конца участка. Графически зависимость средней температуры потока T от концентрации присадки приведена на рис. 2.

Таким образом, зависимость разницы тепловых потерь от концентрации присадки имеет асимптотический характер, который в некоторой степени похож на зависимость эффективности ПТП от концентрации. Напрашивается вывод о зависимости максимальной тепловой эффективности ПТП от предельного значения эффективности ПТП, при котором с увеличением концентрации присадки последующее увеличение эффективности не наблюдается.

Температура в конце участка зависит от длины участка согласно формуле Шухова. Учет влияние присадки на шуховское распределение температуры и представим результаты на рис. 3.

С добавлением полимерного агента область более высоких температур расширяется (то есть на одинаковом расстоянии от начала участка с увеличением концентрации присадки наблюдается более высокая температура, чем при нулевой концентрации присадки) и интенсивность уменьшения температуры с длиной падает. Теоретически представляется возможным увеличивать тепловую эффективность ПТП, используя присадки, обладающие наибольшим предельным значением эффективности. Актуализируется применение высокоэффективных присадок, эффективность которых, согласно данным авторов, может достигать значений до 80 %, что делает применение ПТП в качестве способа уменьшения тепловых потерь перспективным направлением в развитии отрасли трубопроводного транспорта.

Рассмотрим совокупное влияние тепловой и гидравлической эффективности на экономическую разницу перекачки с ПТП и без, учитывая также стоимость присадки [33]. Разницы затрат на привод насосов (фиолетовая линия) и на подогрев нефти (бежевая линия) вычислены по формуле (17) и (16), соответственно. Разница стоимости перекачки с ПТП и без, не учитывая стоимость ПТП (голубая линия), представляет собой сумму значений, полученных по формулам (16) и (17). Учет в данном значении стоимости присадки (зеленая линия) представляет собой голубую линию, уменьшенную на величину, вычисленную по формуле (18).

Зависимости стоимости составляющих перекачки с ПТП и без от концентрации ПТП приведены на рис. 4.

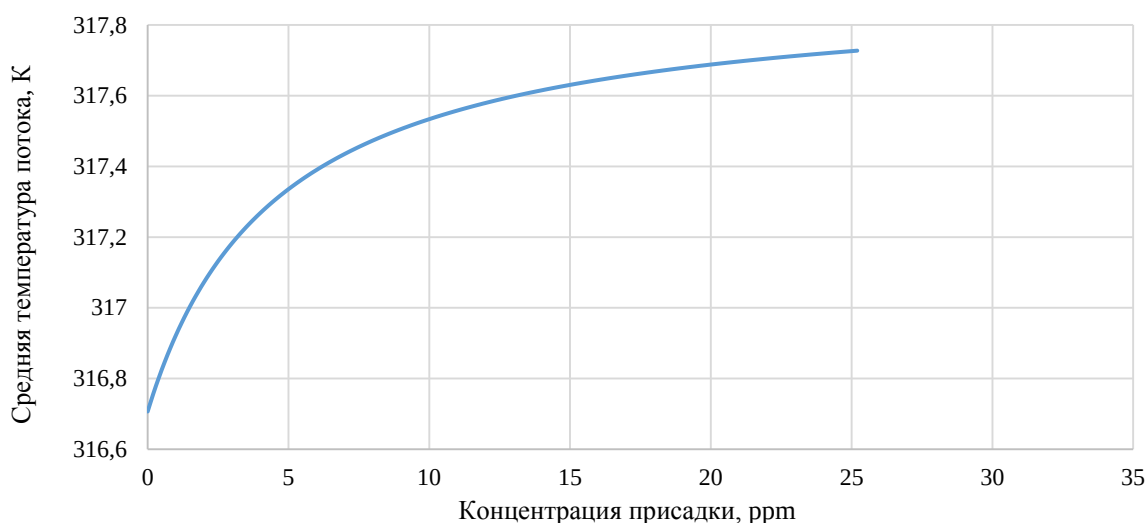


Рис. 2. Зависимость температуры потока от концентрации присадки

Fig. 2. Dependence of flow temperature on additive concentration

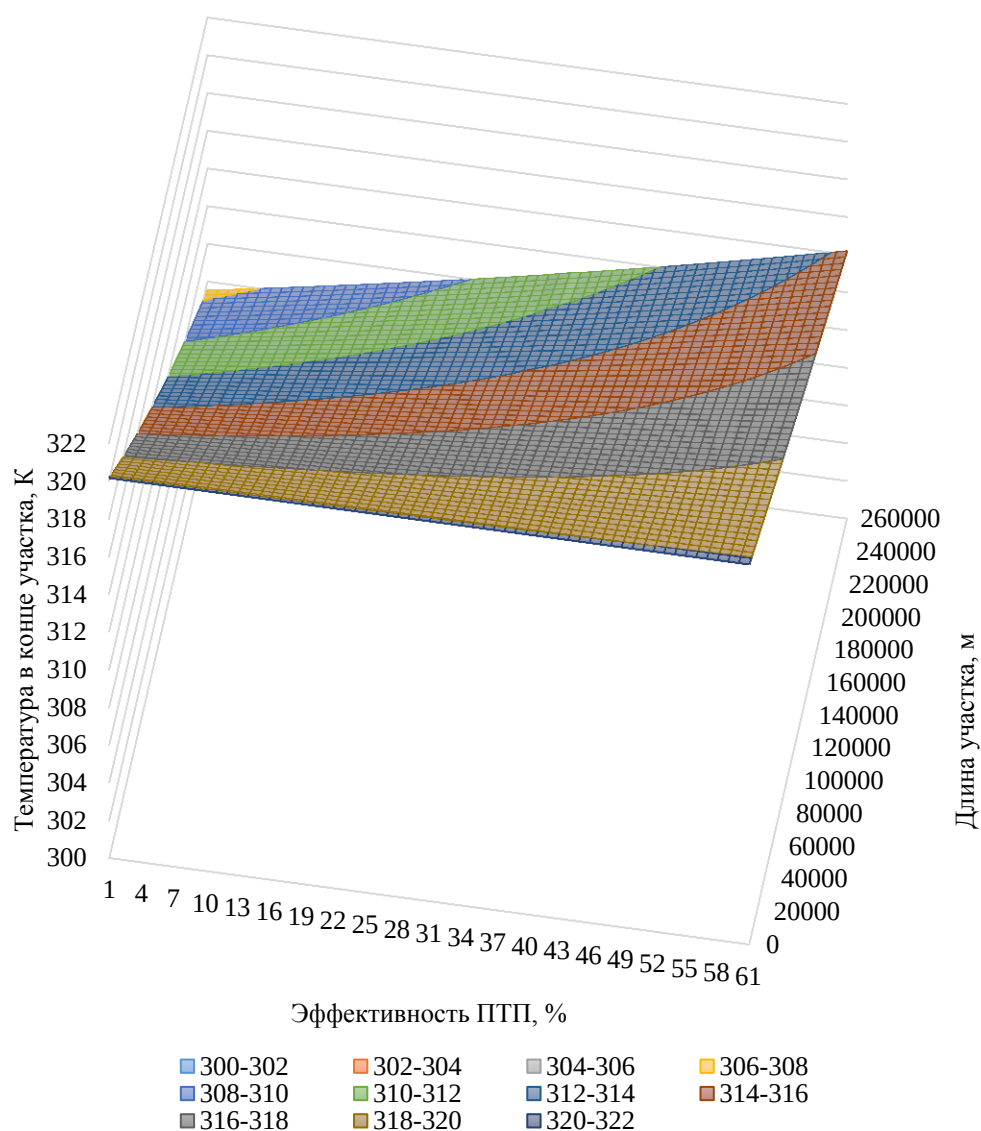


Рис. 3. Зависимость температуры в конце участка от длины участка и эффективности ПТП

Рис. 3. Dependence of the temperature at the end of the section on the section length and the DRA efficiency

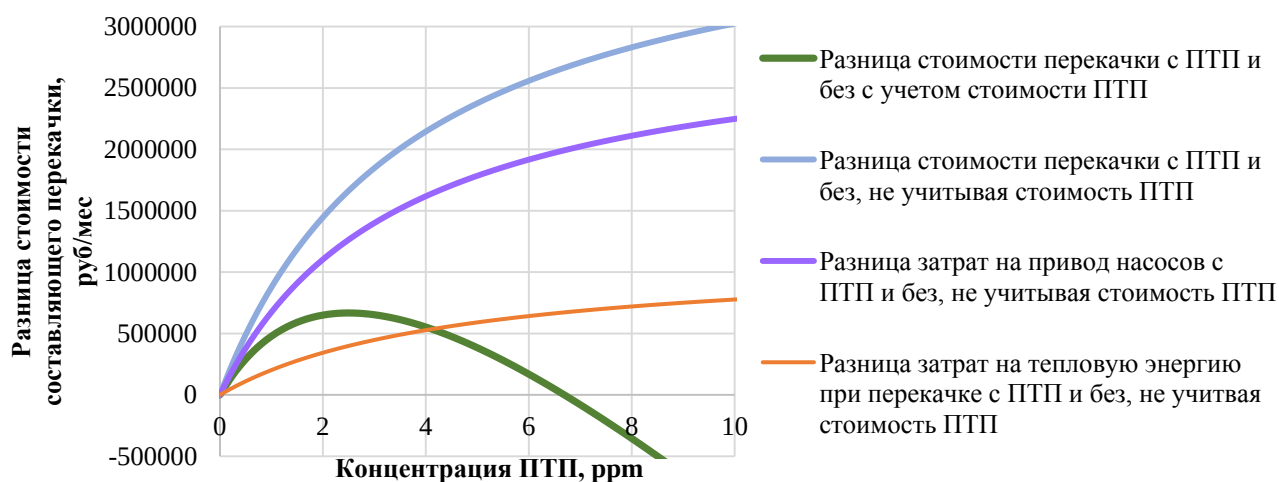


Рис. 4. Зависимости стоимости составляющих перекачки с ПТП и без от концентрации ПТП

Fig. 4. Dependences of the cost of pumping components with and without anti-turbulence additives on the DRA concentration

Выгода от применения ПТП увеличивается с ростом ее концентрации. Наибольшая выгода от применения ПТП с учетом ее стоимости составляет ≈ 666594 р./мес и наблюдается при концентрации ПТП около 2,6 ppm. В расчете не учитывалась деградация полимера. При более высоких концентрациях ПТП затраты на саму присадку превалируют над эффектом экономии затрат на электроэнергию и на нагрев продукта, а при концентрации $\approx 6,8$ ppm (эффективность 33 %) применение ПТП становится невыгодным.

Выгода от экономии энергии на привод насосов превалирует над экономией затрат на энергию тепловых печей. При данной концентрации экономический вклад тепловой и гидравлической составляющей в снижение затрат на перекачку представлен на рис. 5.

Для анализа тепловых потерь проведем оценку правой части формулы (19) и выясним, какое из слагаемых вносит наибольший вклад в изменение внутренней энергии. Для этого предположим, что ПТП влияет либо только на первое слагаемое (теплообмен с окружающей средой), либо только на второе слагаемое (выделение тепла за счет сил внутреннего трения), и сравним, какая из кривых зависимости энергии от эффективности присадки ближе к кривой суммарного воздействия присадки как на первое, так и на второе слагаемое. Данный график приведен на рис. 6.

ПТП влияет на теплообмен с окружающей средой путем уменьшения коэффициента теплопередачи, а на диссипацию путем уменьшения коэффициента гидравлического сопротивления, который входит в гидравлический уклон. Таким образом, влияние ПТП на теплообмен с окружающей средой

преобладает над влиянием ПТП на силу внутреннего трения, что заметно по разности начального и конечного положений кривых. Кривая влияния на теплообмен с окружающей средой гораздо ближе к кривой суммарного влияния ПТП. Действительно, найдя средние относительные значения вклада каждого слагаемого правой части формулы (19) в изменение внутренней энергии, получаем картину, представленную на рис. 7.



Рис. 5. Экономический вклад тепловой и гидравлической составляющей в снижение затрат на перекачку

Fig. 5. Economic contribution of the thermal and hydraulic component to the reduction of pumping costs

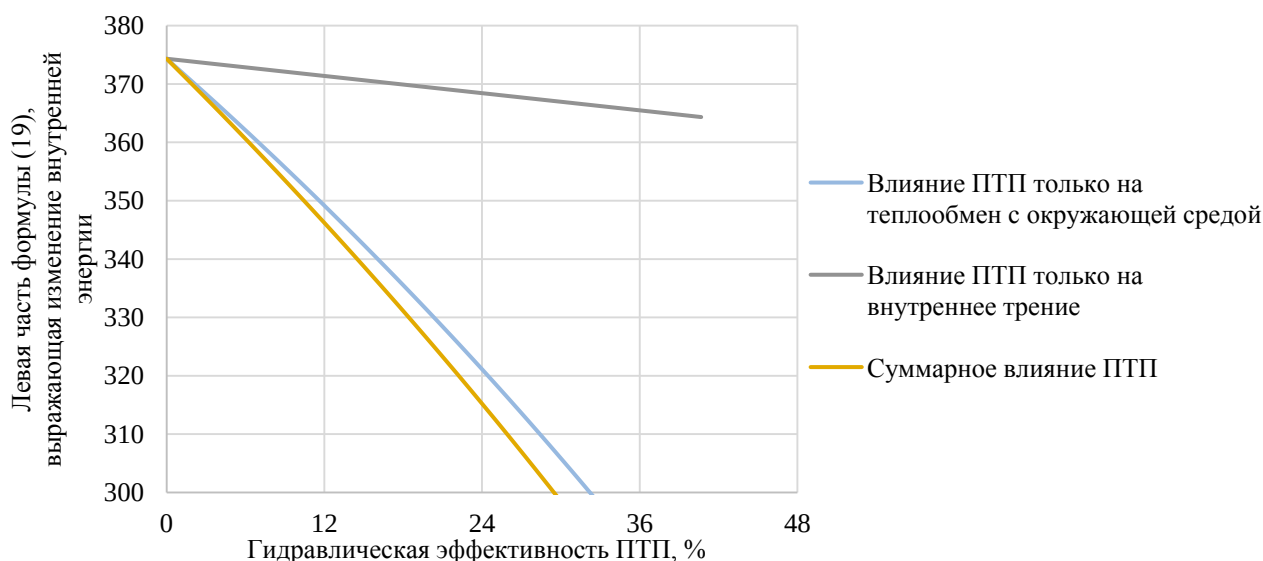


Рис. 6. График зависимости скорости изменения внутренней энергии от гидравлической эффективности ПТП

Fig. 6. Graph of the dependence of the internal energy rate of change on the DRA hydraulic efficiency



Рис. 7. Степень влияния ПТП на причины тепловых потерь

Fig. 7. Degree of DRA impact on the causes of heat losses

Для полноты картины изобразим график, представленный на рис. 6, в зависимости от концентрации ПТП, а не от эффективности (рис. 8).

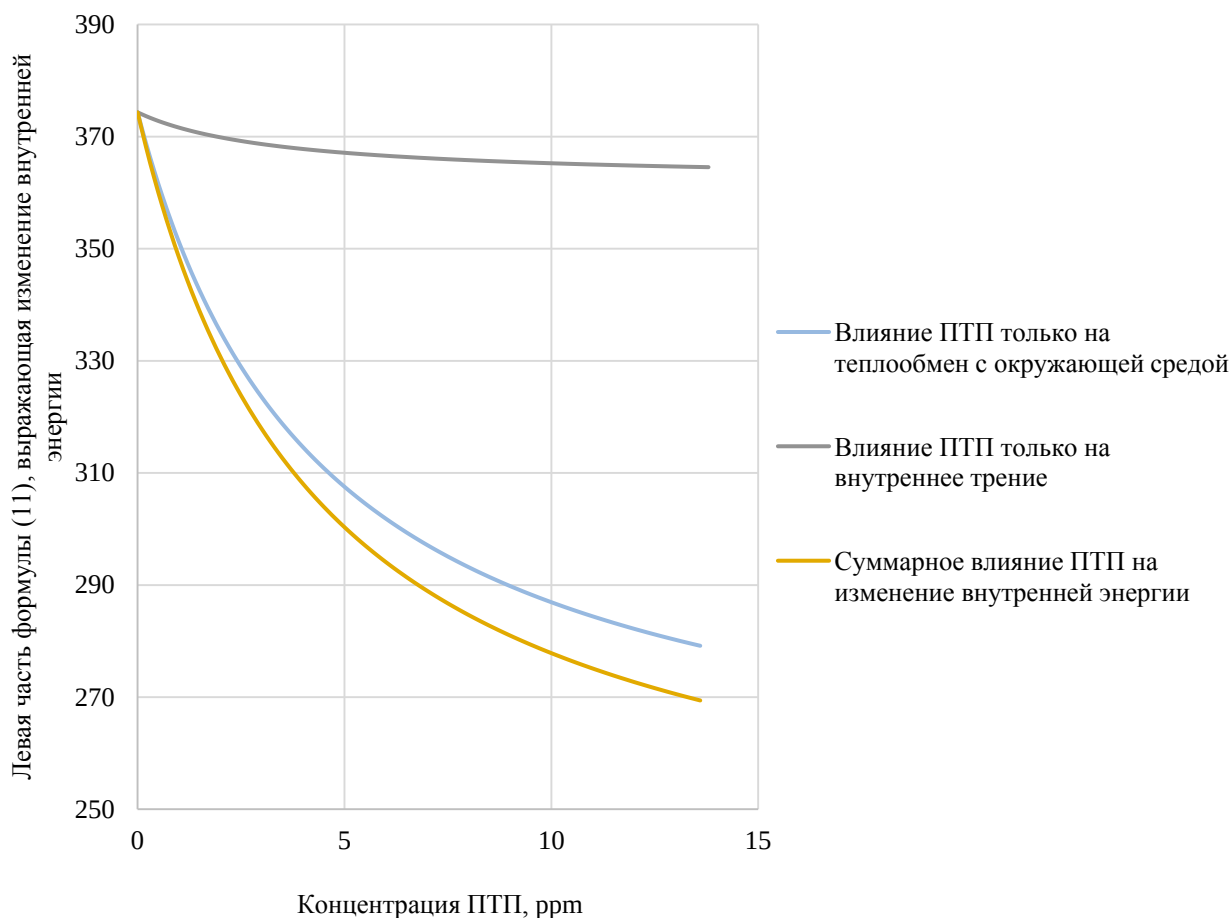


Рис. 8. График зависимости скорости изменения внутренней энергии от концентрации ПТП

Fig. 8. Graph of the dependence of internal energy rate of change on the DRA concentration

В результате того, что скорость роста гидравлической эффективности ПТП уменьшается при возрастании концентрации ПТП, наибольшее изменение внутренней энергии в части снижения тепловых потерь наблюдается при малых концентрациях ПТП, однако сами тепловые потери сокращаются с продолжением ввода ПТП, но менее интенсивно.

Обсуждение и заключение

ПТП влияют на теплообменные процессы в трубопроводе. Они уменьшают трение слоев жидкости друг об друга, а также способствуют понижению интенсивности теплообмена между перекачиваемой жидкостью и стенками трубопровода, что приводит к снижению тепловых потерь.

Численное моделирование подтверждает эффективность присадок в уменьшении тепловых потерь. Однако для достижения оптимальных результатов необходимо учитывать тип присадки, концентрацию, скорость перекачки жидкости и характеристики трубопровода. Подходящие ПТП и оптимальные условия их применения должны определяться для конкретного случая.

В настоящей работе авторы устанавливают зависимость между концентрацией ПТП и ее экономической эффективностью в части гидравлических и тепловых потерь, а также сопоставляют процентное влияние присадки на гидравлические и тепловые потери при максимальной выгоде от применения ПТП. На рассматриваемом участке трубопровода со стандартными параметрами перекачки гидравлическая эффективность присадки превалирует над тепловой, что позволяет сделать вывод о целесообразном вводе ПТП на краткосрочной основе для уменьшения теплоотдачи в системе «трубопровод–грунт» при изменившихся условиях транспортировки.

Произведен расчет согласно методике, приведенной в работе [26], при котором зависимость температуры продукта с присадкой выражается параметрами чистого растворителя. Наибольший эффект снижения потерь наблюдается при высоких значениях эффективности присадки, однако в данном случае возникает существенное влияние стоимости присадки на экономическую эффективность применения ПТП, что перекрывает выгоду от эффекта ввода добавки.

Применение ПТП в качестве регулятора теплообмена представляется экономически выгодным при превалировании экономии мощности электрических нагревательных печей над стоимостью присадки, что не представляется возможным достичь при небольших концентрациях и эффективностях ПТП, так как в данном случае целесообразно вводить присадку в качестве агента снижения гидравлических потерь, а не тепловых. Учитывая высокую стоимость присадок, их применение в качестве способа уменьшения тепловых потерь остается открытым вопросом, так как исходя из расчетных

данных при небольших концентрациях ПТП выгода от применения ПТП в качестве регулятора тепловых потерь меньше, чем от эффекта снижения гидравлического сопротивления.

В части уменьшения тепловых потерь действие ПТП в большей степени направлено на снижение интенсивности теплообмена с окружающей средой, а не на уменьшение сил внутреннего трения. Необходимо проведение дополнительных испытаний в лабораторных/стендовых условиях и на промышленных объектах для уточнения результатов исследования.

Применение ПТП является одним из способов снижения тепловых потерь при перекачке жидкости по трубопроводу, что оказывает положительное влияние на гидродинамическое поведение потока, улучшая его равномерность, снижая потери энергии на трение и уменьшая образование турбулентных структур и вихрей. Однако из-за высокой стоимости присадок их применение может быть наименее выгодным по сравнению с увеличением мощности тепловых печей, и в настоящий момент оправдано их добавление в качестве агента снижения именно гидравлических потерь, а не тепловых.

Механизм влияния ПТП на свойства потока является не до конца изученным, что обуславливает необходимость проведения исследований в различных областях применения ПТП, делая изучение полимерных агентов актуальной и востребованной тематикой. Дальнейшие исследования в этой области могут быть направлены на оптимизацию типов ПТП, разработку новых материалов и технологий, в частности высокоэффективных ПТП, а также детальное изучение их воздействия на теплообменные процессы в трубопроводах.

СПИСОК ЛИТЕРАТУРЫ

1. Thermal insulation and flame retardancy of the hydroxyapatite nanorods/sodium alginate composite aerogel with a double-crosslinked structure / J. Zhu, X. Li, D. Li, C. Jiang // *ACS Applied Materials & Interfaces*. – 2022. – Vol. 14 (40). – P. 45822–45831.
2. Cardoso A.J.M., Koptjaev E. Electrical heating system for oil pipelines // *Applications and Manufacturing (ICIEAM). Proc. of the International Conference on Industrial Engineering*. – Sochi, Russian Federation, 2022. – P. 368–373.
3. Sarkar A., Kumar A.A. A survey on optimization parameters and techniques for crude oil pipeline transportation modeling // *Simulation and Optimization*. – 2022. – Vol. 292. – P. 561–574.
4. Голунов Н.Н. Уменьшение смеси при последовательной перекачке нефтепродуктов // *Наука и технологии трубопроводного транспорта нефти и нефтепродуктов*. – 2018. – № 1. – С. 68–73.
5. Manning W., Lind G. Data analysis and discussion of product interface size on a batched crude oil pipeline // *Pipeline Simulation Interest Group. Proc. of PSIG Annual Meeting*. – Baltimore, Maryland, USA, 2014. – P. 1258–1263.
6. Голунов Н.Н., Лурье М.В. Об одном способе уменьшения смеси при последовательной перекачке нефтепродуктов // *Известия вузов «Нефть и газ»*. – 2006. – № 3. – С. 49–52.
7. Ridao M.A. Optimal use of DRA in oil pipelines // *Proc. of IEEE International Conference on Systems, Man and Cybernetics*. – The Hague, Netherlands, 2004. – Vol. 6. – P. 6256–6261.
8. Effects of drag-reducing polymers on the flow patterns, pressure gradients, and drag-reducing rates of horizontal oil–water flows / J. Tan, H. Hu, S. Vahaji, J. Jing // *International Journal of Multiphase Flow*. – 2022. – Vol. 153. – P. 104–136.
9. Махмудов Р.П. Исследование существующих методов увеличения пропускной способности промышленных трубопроводов // *Наука и образование в XXI веке: Материалы Двенадцатой Международной научно-практической конференции*. – Томск: ИЦ «Quantum», 2022. – С. 3.
10. Turbulent drag reduction with an ultra-high-molecular-weight water-soluble polymer in slick-water hydrofracking / J. Wei, W. Jia, L. Zuo, H. Chen // *Molecules*. – 2022. – Vol. 27. – № 2. – P. 351–365.
11. Nieuwstadt F.T.M., Den Toonder J.M.J. Drag reduction by additives: a review // *Turbulence structure and modulation. international centre for mechanical sciences*. – Vienna: Springer, 2001. – Vol. 415. – P. 269–316.

12. Varnaseri M., Peyghambarzadeh S.M. The effect of polyacrylamide drag reducing agent on friction factor and heat transfer coefficient in laminar, transition and turbulent flow regimes in circular pipes with different diameters // *International Journal of Heat and Mass Transfer*. – 2020. – Vol. 154. – № 2. – P. 1–15.
13. Biomass-based polymers as effective drag-reducing agents in turbulent flow / P.K. Bhatia, S. Agrawal, I. Sreedhar, P. Parameshwaran // *Biomass Conversion and Biorefinery*. – 2022. – № 3. – P. 1–6.
14. Sellin R.H.J., Hoyt J.W., Scriven O. The effect of drag reducing additives on fluid flows and their industrial applications. Part I: Basic aspects. – 1982. – Vol. 20. – P. 29–68.
15. Orang M., Pouranfard A. Experimental, comparative and statistical study of heat transfer and drag reduction of Water/Polyisobutylene/nanoSiO₂ poly-nanofluid through a horizontal pipe // *Chemical Engineering Research and Design*. – 2022. – Vol. 183. – P. 466–477.
16. Чашин И.П., Пьянков А.Г. Исследование влияния органических добавок на гидравлические сопротивления и теплообмен в потоке // *Инженерно-физический журнал*. – 1973. – № 6. – С. 1101–1106.
17. Повх И.Л., Ступин А.Б., Максютенко С.Н. Турбулентный теплообмен в слабых растворах полимеров и поверхностно-активных веществ // *Тепломассообмен: материалы V Всесоюзной конференции по тепломассообмену*. – Минск: ИТМО им. А.В. Лыкова, 1976. – С. 284–292.
18. Жолобов В.В., Синельников С.В., Игнатенкова А.И. Перспективы применения противотурбулентной присадки для снижения энергозатрат тепловых станций при «горячей» перекачке // *Наука и технологии трубопроводного транспорта нефти и нефтепродуктов*. – 2019. – № 3. – С. 256–265.
19. Жуков В.А. Научные основы повышения эксплуатационных показателей высокооборотных судовых ДВС совершенствованием их охлаждения: дис. ... д-ра техн. наук. – СПб, 2012. – 422 с.
20. Моделирование теплового режима при создании контролируемого слоя АСПО на внутренней поверхности нефтепроводов / П.А. Ревель-Муроз, Н.Р. Гильмутдинов, М.Е. Дмитриев, Б.Н. Мастобаев // *Транспорт и хранение нефтепродуктов и углеводородного сырья*. – 2016. – № 1. – С. 11–14.
21. Применение полимерных агентов снижения сопротивления в трубопроводном транспорте нефти / Г.В. Несын, В.В. Жолобов, Ф.С. Зверев, А.И. Гольянов, С.Е. Кутуков, А.Ю. Ляпин, А.Ю. Ляпин. 1-е изд. – М.: Техносфера, 2022. – 310 с.
22. Myska J., Zakin J.L., Chara Z. Viscoelasticity of a surfactant and its drag-reducing ability // *Applied Scientific Research*. – 1995. – Vol. 55. – P. 297–310.
23. Christensen R.N., Zakin J.L. Drag and heat transfer reduction in circular tubes and plate fin heat exchangers // *Proceedings of the International District Heating and Cooling Association*. – 1991. – Vol. 81. – P. 189–202.
24. Шагиев Р.Г. Гидравлическое сопротивление и теплообмен в неизотермических нефтепроводах с противотурбулентными присадками // *Проблемы сбора, подготовки и транспорта нефти и нефтепродуктов*. – 2020. – № 3 (125). – С. 50–62.
25. Шагиев Р.Г. Гидравлическое сопротивление и теплообмен в неизотермических нефтепроводах, транспортирующих неньютоновскую нефть с использованием противотурбулентных присадок // *Проблемы сбора, подготовки и транспорта нефти и нефтепродуктов*. – 2020. – № 5 (127). – С. 65–75.
26. Жолобов В.В., Морецкий В.Ю., Талипов Р.Ф. Оценка влияния противотурбулентной присадки на температуру транспортируемой жидкости // *Трубопроводный транспорт: материалы XVI международной конференции*. – Уфа: УГНТУ, 2021. – С. 77–79.
27. Валеев А.Р. Тепловые режимы трубопроводов. вопрос учета нагрева нефти и газа в трубопроводах // *Электронный научный журнал нефтегазовое дело*. – 2009. – № 2. – С. 3–14. URL: http://ogbus.ru/files/ogbus/authors/Valeev/Valeev_1.pdf (дата обращения 01.06.2023).
28. The drag reduction phenomenon. Observed characteristics, improved agents, proposed mechanisms / R.C. Little, R.J. Hansen, D.L. Hunston, O. Kim, R.L. Patterson, R.Y. Ting // *Industrial & Engineering Chemistry Fundamentals*. – 1975. – Vol. 14 (4). – P. 283–296.
29. Черников В.А., Челинцев Н.С. О совершенствовании методов определения эффективности применения противотурбулентных присадок магистральных нефтепродуктопроводах // *Наука и технологии трубопроводного транспорта нефти и нефтепродуктов*. – 2011. – № 1. – С. 58–61.
30. Kuhn J. et al. Destabilizing turbulence in pipe flow // *Nature Physics*. – 2018. – Vol. 14 (4). – P. 386–390.
31. Банерджи Т., Шестаков Р. А. Способ повышения экономической эффективности применения противотурбулентных присадок // *Известия Томского политехнического университета*. – 2022. – № 11. – С. 207–217.
32. Лурье М.В. Математическое моделирование процессов трубопроводного транспорта нефти, нефтепродуктов и газа. – М.: Изд-во «Нефть и газ» РГУ нефти и газа им. И.М. Губкина, 2003. – 335 с.
33. Применение противотурбулентных присадок на «горячих» нефтепроводах / В.В. Жолобов, Г.В. Несын, Ф.С. Зверев, И.И. Хасбиуллин, М.И. Валиев // *Наука и технологии трубопроводного транспорта нефти и нефтепродуктов*. – 2018. – Т. 8. – № 5. – С. 496–509.

Информация об авторах

Таноя Банерджи, студент кафедры нефтепродуктообеспечения и газоснабжения, Российский государственный университет нефти и газа (НИУ) имени И.М. Губкина, Россия, 119991, г. Москва, Ленинский пр., 65, стр. 1. tanoyabaner@mail.ru

Роман Алексеевич Шестаков, кандидат технических наук, доцент кафедры нефтепродуктообеспечения и газоснабжения, Российский государственный университет нефти и газа (НИУ) имени И.М. Губкина, Россия, 119991, г. Москва, Ленинский пр., 65, стр. 1. shestakov.r@gubkin.ru

Поступила в редакцию: 26.10.2023

Поступила после рецензирования: 13.11.2023

Принята к публикации: 03.09.2024

REFERENCES

1. Zhu J., Li X., Li D., Jiang C. Thermal insulation and flame retardancy of the hydroxyapatite nanorods. sodium alginate composite aerogel with a double-crosslinked structure. *ACS Applied Materials & Interfaces*, 2022, vol. 14 (40), pp. 45822–45831.
2. Cardoso A.J.M., Koptjaev E. Electrical heating system for oil pipelines. *Applications and Manufacturing (ICIEAM). Proc. of the International Conference on Industrial Engineering*. Sochi, Russian Federation, 2022. pp. 368–373.
3. Sarkar A., Kumar A.A. A survey on optimization parameters and techniques for crude oil pipeline transportation modeling. *Simulation and Optimization*, 2022, vol. 292, pp. 561–574.
4. Golunov N.N. Decrease of volume of oil products mixture during batching. *Science & Technologies: Oil and Oil Products Pipeline Transportation*, 2018, no. 1, pp. 68–73. (In Russ.)
5. Manning W., Lind G. Data analysis and discussion of product interface size on a batched crude oil pipeline. *Pipeline Simulation Interest Group. Proc. of PSIG Annual Meeting*. Baltimore, Maryland, USA, 2014. pp. 1258–1263.
6. Golunov H.H., Lure M.V. About one method of reducing the mixture during sequential pumping of petroleum products. *Izvestiia vuzov «Nefi i gaz»*, 2006, no. 3, pp. 49–52. (In Russ.)
7. Ridao M.A. Optimal use of DRA in oil pipelines. *Man and Cybernetics. Proc. of IEEE International Conference on Systems*. The Hague, Netherlands, 2004. Vol. 6, pp. 6256–6261.
8. Tan J., Hu H., Vahaji S., Jing J. Effects of drag-reducing polymers on the flow patterns, pressure gradients, and drag-reducing rates of horizontal oil–water flows. *International Journal of Multiphase Flow*, 2022, vol. 153, pp. 104–136.
9. Makhmudov R.P. Study of existing methods for increasing the capacity of field pipelines. *Science and education in the XXI century. Proc. of the Twelfth International scientific conference*. Tomsk, «Quantum» Publ., 2022. pp. 3. (In Russ.)
10. Wei J., Jia W., Zuo L., Chen H. Turbulent drag reduction with an ultra-high-molecular-weight water-soluble polymer in slick-water hydrofracking. *Molecules*, 2022, vol. 27, no. 2, pp. 351–365.
11. Nieuwstadt F.T.M., Den Toonder J.M.J. Drag reduction by additives: a review. *Turbulence Structure and Modulation*, 2001, vol. 415, pp. 269–316.
12. Varnaseri M., Peyghambarzadeh S.M. The effect of polyacrylamide drag reducing agent on friction factor and heat transfer coefficient in laminar, transition and turbulent flow regimes in circular pipes with different diameters. *International Journal of Heat and Mass Transfer*, 2020, vol. 154, no. 2, pp. 1–15.
13. Bhatia P.K., Agrawal S., Sreedhar I., Parameshwaran P. Biomass-based polymers as effective drag-reducing agents in turbulent flow. *Biomass Conversion and Biorefinery*, 2022, no. 3, pp. 1–6.
14. Sellin R.H.J., Hoyt J.W., Scrivener O. The effect of drag reducing additives on fluid flows and their industrial applications. Part I: Basic aspects. *Journal of Hydraulic Research*, 1982, vol. 20, pp. 29–68.
15. Orang M., Pouranfard A. Experimental, comparative and statistical study of heat transfer and drag reduction of Water/Polyisobutylene/nanoSiO₂ poly-nanofluid through a horizontal pipe. *Chemical Engineering Research and Design*, 2022, vol. 183, pp. 466–477.
16. Chashchin I.P., Pyankov A.G. Investigation of the effect of organic additives on hydraulic resistances and heat exchange in the flow. *Inzhenerno-fizicheskij zhurnal*, 1973, no. 6, pp. 1101–1106. (In Russ.)
17. Povh I.L., Stupin A.B., Maksyutenko S.N. Turbulent heat exchange in weak solutions of polymers and surfactants. *Heat and mass transfer. Proc. of the fifth All-Russian on Heat and Mass Transfer*. Minsk, A.V. Luikov HMTI Publ., 1976. pp. 284–292. (In Russ.)
18. Zholobov V.V., Sinelnikov S.V., Ignatenkova A.I. The prospects of DRA for reducing the energy consumption of thermal stations in a «hot» pumping. *Science & Technologies: Oil and Oil Products Pipeline Transportation*, 2019, no. 3, pp. 256–265. (In Russ.)
19. Zhukov V.A. *Scientific basis for increasing the performance indicators of high-speed marine internal combustion engines by improving their cooling*. Dr. Diss. St Petersburg, 2012. 422 p. (In Russ.)
20. Revel-Muroz P.A., Gilmudtinov N.R., Dmitriev M.E., Mastobaev B.N. *Modeling of thermal conditions when creating a controlled layer of asphalt on the inner surface of oil pipelines*. *THNP*, 2016, no. 1, pp. 11–14. (In Russ.)
21. Nesyn G.V., Zholobov V.V., Zverev F.S., Golyanov A.I., Kutukov S.E., Lyapin A.Yu., Lyapin A.Yu. *Application of polymer drag reducing agents in oil pipeline transport*. Moscow, Technosphaera Publ., 2022. 310 p.
22. Myska J., Zakin J.L., Chara Z. Viscoelasticity of a surfactant and its drag-reducing ability. *Applied Scientific Research*, 1995, vol. 55, pp. 297–310.
23. Christensen R.N., Zakin J.L. Drag and heat transfer reduction in circular tubes and plate fin heat exchangers. *Proceedings of the International District Heating and Cooling Association*, 1991, vol. 81, pp. 189–202.
24. Shagiev R.G. Hydraulic resistance and heat transfer in non-isothermal oil pipelines with drag reducing additives. *Problems of gathering, treatment and transportation of oil and oil products*, 2020, no. 3 (125), pp. 50–62. (In Russ.)
25. Shagiev R.G. Hydraulic resistance and heat transfer in non-isothermal pipelines, transporting non-newtonian oils using drag reducing additives. *Problems of gathering, treatment and transportation of oil and oil products*. 2020, no. 5 (127), pp. 65–75. (In Russ.)
26. Zholobov V.V., Moreckiy V.Yu., Talipov R.F. Assessment of the influence of anti-turbulence additive on the temperature of the transported liquid. *Pipeline transport. Proc. of the XVI International conference*. Ufa, USPTU Publ., 2021. pp. 77–79.
27. Valeev A.R. Thermal conditions of pipelines. the issue of accounting for heating of oil and gas in pipelines. *Elektronny nauchny zhurnal neftegazovoe delo*, 2009, no. 2, pp. 3–14. (In Russ.) Available at: http://ogbus.ru/files/ogbus/authors/Valeev/Valeev_1.pdf (accessed 1 June 2023).

28. Little R.C., Hansen R.J., Hunston D.L., Kim O., Patterson R.L., Ting R.Y. The drag reduction phenomenon. Observed characteristics, improved agents, proposed mechanisms. *Industrial & Engineering Chemistry Fundamentals*, 1975, vol. 14 (4), pp. 283–296.
29. Chernikin V.A., Chelincev N.S. Improving methods used to define efficiency of anti-turbulent dopant in main pipelines. *Oil and Oil Products Pipeline Transportation: Science & Technologies*, 2011, no. 1, pp. 58–61. (In Russ.)
30. Kuhn J. Destabilizing turbulence in pipe flow. *Nature Physics*, 2018, vol. 14 (4), pp. 386–390.
31. Banerjee T., Shestakov R. A. Method for increasing the economic efficiency of the use of anti-turbulent additives. *Bulletin of the Tomsk Polytechnic University. Geo Assets Engineering*, 2022, vol. 333, no. 11, pp. 207–217. (In Russ.)
32. Lurie M.V. Mathematical modeling of pipeline transport processes for oil, petroleum products and gas. Moscow, RSU of Oil and Gas Publ., 2003. 335 p. (In Russ.)
33. Zholobov V.V., Nesyn G.V., Zverev F.S., Hasbiullin I.I., Valiev M.I. Application of drag reducing agents in «hot» oil pipelines. *Oil and Oil Products Pipeline Transportation: Science & Technologies*, 2018, vol. 8, no. 5, pp. 496–509. (In Russ.)

Information about the authors

Tanoya Banerjee, Student, National University of Oil and Gas «Gubkin University», 65, bld. 1, Leninsky avenue, Moscow, 119991, Russian Federation. tanoyabaner@mail.ru

Roman A. Shestakov, Cand. Sc., Associate Professor, National University of Oil and Gas «Gubkin University», 65, bld. 1, Leninsky avenue, Moscow, 119991, Russian Federation. shestakov.r@gubkin.ru

Received: 26.10.2023

Revised: 13.11.2023

Accepted: 03.09.2024

УДК 661.2; 666.9.015.423; 666.123.32; 546.221.1
DOI: 10.18799/24131830/2024/9/4488
Шифр специальности ВАК: 2.6.7

Возможность переработки фосфогипса с получением подщелачивающего реагента

Д.И. Монастырский, М.А. Куликова, Н.П. Шабельская✉, В.А. Ульянова, М.А. Егорова

*Южно-Российский государственный политехнический университет (НПИ) имени М.И. Платова,
Россия, г. Новочеркасск*

✉ nina_shabelskaya@mail.ru

Аннотация. Актуальность. Определяется необходимостью разработки технологии утилизации твердых и жидких производственных отходов с получением органо-неорганического удобрения. Рост промышленного производства сопровождается увеличением отходов. В современном обществе уделяется значительное внимание проблеме переработки техногенных отходов с получением востребованных продуктов. Фосфогипс является основным побочным продуктом производства удобрений и фосфорной кислоты, это многотоннажный отход, его складирование приводит к выводу из обращения обширных территорий. Жидкие отходы свинокомплексов также необходимо перерабатывать в органические удобрения. **Цель.** Изучение процесса термообработки фосфогипса в присутствии восстановителя для получения подщелачивающего реагента. Это позволит в дальнейшем организовать процесс переработки жидких и твердых сельскохозяйственных и промышленных отходов и производить отечественные органоминеральные удобрения. **Методы.** Термообработка фосфогипса в присутствии восстановителя с последующим приготовлением водной суспензии для получения агента, снижающего кислотность животноводческих стоков. Полученные в ходе исследования образцы термообработанного фосфогипса были охарактеризованы с помощью рентгенофазового анализа, электронной микроскопии. На их основе были получены суспензии с различным значением pH. **Результаты и выводы.** Проведено изучение процесса термообработки крупнотоннажного неорганического отхода химической промышленности – фосфогипса. Установлено, что суспензия термообработанного в присутствии восстановителя фосфогипса имеет повышенные значения водородного показателя, что может быть использовано для получения подщелачивающего реагента для обработки сельскохозяйственных отходов. Выявлены оптимальные технологические режимы получения реагента, имеющего максимальное значение pH суспензии: количество введенного восстановителя – 0,16 моль/моль CaSO_4 , температура термообработки 1000 °С.

Ключевые слова: восстановление фосфогипса, древесный уголь, отходы производства фосфорной кислоты, переработка фосфогипса

Благодарности: Работа выполнена при финансовой поддержке Министерства науки и высшего образования РФ в рамках государственного задания, проект FENN-2024-0006 «Разработка технологии неорганических ультрафиолетовых красителей». Авторы выражают благодарность сотруднику центра коллективного пользования Южно-Российского государственного политехнического университета (НПИ) имени М.И. Платова кандидату технических наук Алексею Николаевичу Яценко за помощь в съемке и расшифровке данных РФА и выполнение микроскопических исследований.

Для цитирования: Возможность переработки фосфогипса с получением подщелачивающего реагента / Д.И. Монастырский, М.А. Куликова, Н.П. Шабельская, В.А. Ульянова, М.А. Егорова // Известия Томского политехнического университета. Инжиниринг георесурсов. – 2024. – Т. 335. – № 9. – С. 183–190. DOI: 10.18799/24131830/2024/9/4488

UDC 661.2; 666.9.015.423; 666.123.32; 546.221.1
DOI: 10.18799/24131830/2024/9/4488

Possibility of processing phosphogypsum to obtain an alkalizing reagent

D.I. Monastyrsky, M.A. Kulikova, N.P. Shabelskaya✉, V.A. Ulyanova, M.A. Egorova

Platov South-Russian State Polytechnic University (NPI), Novocherkassk, Russian Federation

✉ nina_shabelskaya@mail.ru

Abstract. Relevance. The need to develop a technology for the disposal of solid and liquid industrial waste to obtain organic-inorganic fertilizer. The growth of industrial production is accompanied by an increase in waste. In modern society, considerable attention is paid to the problem of processing man-made waste to obtain demanded products. Phosphogypsum is the main by-product of the production of fertilizers and phosphoric acid, it is a multi-tonnage waste, its storage leads to the withdrawal of vast territories from circulation. Liquid waste from pig farms also needs to be processed into organic fertilizers. **Aim.** To study the process of heat treatment of phosphogypsum in the presence of a reducing agent to obtain an alkalizing reagent. This will make it possible to further organize processing liquid and solid agricultural and industrial waste and produce domestic organic fertilizers. **Methods.** Heat treatment of phosphogypsum in the presence of a reducing agent, followed by the preparation of an aqueous suspension to obtain an agent that reduces the acidity of livestock effluents. The samples of heat-treated phosphogypsum obtained during the study were characterized by X-ray phase analysis, electron microscopy. Suspensions with different pH values were obtained on their basis. **Results and conclusions.** The authors have studied heat treatment of large-tonnage inorganic waste of the chemical industry – phosphogypsum. It was found that the suspension of phosphogypsum heat-treated in the presence of a reducing agent has increased values of the hydrogen index, which can be used to obtain an alkalizing reagent for treating agricultural waste. The authors revealed the optimal technological modes of obtaining a reagent having the maximum pH value of the suspension: the amount of the introduced reducing agent is 0.16 mol/mol CaSO_4 , the heat treatment temperature is 1000 °C.

Keywords: phosphogypsum recovery, charcoal, phosphoric acid production waste, phosphogypsum processing

Acknowledgements. This research was funded by Ministry of Science and Higher Education of the Russian Federation within the framework of the state assignment of FENN-2024-0006 – “Development of inorganic ultraviolet dyes technology” project. The authors express their gratitude to Alexey N. Yatsenko, Cand. Sc., employee of the Center for Collective Use of the Platonov South-Russian State Polytechnic University (NPI), for assistance in shooting and decoding the X-ray data and performing microscopic studies.

For citation: Monastyrsky D.I., Kulikova M.A., Shabelskaya N.P., Ulyanova V.A., Egorova M.A. Possibility of processing phosphogypsum to obtain an alkalizing reagent. *Bulletin of the Tomsk Polytechnic University. Geo Assets Engineering*, 2024, vol. 335, no. 9, pp. 183–190. DOI: 10.18799/24131830/2024/9/4488

Введение

Рост промышленного производства в современном обществе сопровождается увеличением отходов [1, 2]. В современной научной литературе [3–6] уделяется значительное внимание проблеме переработки техногенных отходов с получением востребованных продуктов. Фосфогипс является основным побочным продуктом производства удобрений и фосфорной кислоты. В настоящее время по оценкам экспертов [7] в России уже накоплено около 140 млн т этого отхода, который ежегодно увеличивается еще на 10 %. Фосфогипс хранят на открытых площадках, что может приводить к возникновению экологических проблем. Это привело к стабильно высокому интересу исследователей к поиску путей использования фосфогипса в качестве альтернативного сырья для различных целей: производства строительных материалов – цемента [8, 9], газобетона [10], в процессах химической газификации [11, 12] и т. п. Однако фосфогипс может быть использован как исходное вещество для получения ценных продуктов. Ряд исследований посвящен этим вопросам. Например, в [13] предложено его применение в процессе циклической газификации угля, в работе [14] – как пигмента, в [15] изучена возможность очистки водных растворов от остатков лекарственных веществ с помощью композиций на основе фосфогипса.

В ряде исследований [16, 17] изучена возможность восстановления фосфогипса в сульфид кальция под

действием газообразного оксида углерода (II) [16], водорода [17]. В литературе не достаточно полно освещен вопрос условий термообработки фосфогипса с получением других продуктов. В этой связи основную цель работы можно сформулировать как изучение процесса термообработки фосфогипса в присутствии восстановителя для получения подщелачивающего реагента. Решение поставленных задач позволит в дальнейшем организовать процесс переработки жидких и твердых сельскохозяйственных и промышленных отходов и производить отечественные органоминеральные удобрения.

Объекты и методика исследования

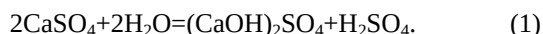
В [18, 19] была предложена методика восстановления фосфогипса в кальций-содержащий продукт на основе сульфида. В данном исследовании был применен фосфогипс для сельского хозяйства марки ТУ 113-08-418-94 (содержание $\text{CaSO}_4 \cdot 2\text{H}_2\text{O}$ не менее 98 %) в количестве 0,1 моль. Для создания восстановительной атмосферы использовали древесный березовый уголь (ГОСТ 7657-84). Образцы отweighивали в соответствии с заданной рецептурой, перемешивали в смесителе, помещали в реакционном сосуде в рабочее пространство печи. Термообработку проводили при температурах 900 и 1000 °C с выдержкой при конечной температуре в течение 1 ч. Скорость подъема температуры 13 °/мин. Охлаждение образцов медленное – с печью, до комнатной температуры.

Полученные образцы были охарактеризованы с помощью рентгенофазового анализа (использовали рентгеновский дифрактометр марки ARL X'TRA, Cu-K α излучение). СЭМ-изображения образцов были получены на сканирующем электронном микроскопе Quanta 200.

Термообработанные образцы фосфогипса были изучены в качестве потенциального подщелачивающего агента. С этой целью был приготовлен ряд суспензий в дистиллированной воде, в серии экспериментов концентрация составляла 5–20 мас. %. Суспензию интенсивно перемешивали в течение 10 минут при температуре 20 °С, далее следовало отстаивание в течение 10 минут при комнатной температуре, при помощи pH-метра марки pH-150M измеряли pH. Параллельно проводили пять измерений. Был проведен расчет погрешности измерений, и как результат использовали среднее значение (при доверительном интервале 95 %).

Результаты исследования и их обсуждение

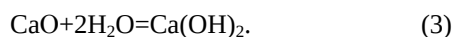
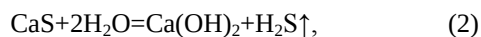
Согласно проведенным исследованиям, суспензия фосфогипса в воде с концентрацией 10 % имеет значение pH 7,14 вследствие протекания реакции гидролиза (1)



Как известно, сульфат кальция – соль, образованная сильной кислотой и основанием средней силы, его гидролиз проходит с образованием основной соли – $(\text{CaOH})_2\text{SO}_4$ – и серной кислоты. Растворимость сульфата кальция в воде при комнатной температуре составляет 0,015 моль/л. Рассчитанное (теоретическое) значение кислотности полученного раствора с концентрацией суспензии 0,015 моль/л составляет pH=7,2. Эти данные хорошо согласуются с полученными экспериментальными результатами.

В исследовании [16] отмечено, что термообработка фосфогипса при температуре 600–800 °С в присутствии большого количества восстановителя (в качестве восстановителя использован оксид углерода (II), соотношение CO/CaSO₄ более 6,81 моль/моль) приводит к получению в восстановленном продукте в основном сульфида кальция (CaS), при более высокой температуре (1000–1500 °С) и меньшем содержании восстановителя образуется оксид кальция (CaO).

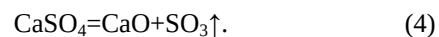
Гидролиз сульфида кальция (2) будет приводить к образованию суспензии со щелочной реакцией, как и взаимодействие оксида кальция с водой (3)



Очевидно, что в случае протекания реакции (2) среда суспензии будет более щелочной.

Для поиска условий проведения реакции при выполнении этого исследования исходили из предположения, что для получения подщелачивающего реагента из фосфогипса следует стремиться к получению образцов, содержащих оксид кальция в большем количестве.

Термическая диссоциация сульфата кальция по реакции (4) возможна при температуре выше 1200 °С [16].



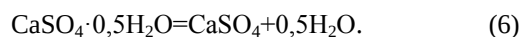
Проведение реакции в присутствии восстановителя [16] позволяет снизить температуру синтеза. В этой связи было проведено исследование возможности получения при пониженной (900–1000 °С) температуре восстановленных образцов фосфогипса с преобладанием в продукте оксида кальция. Количество восстановителя и температурная характеристика процесса указаны в таблице.

Таблица. Количество восстановителя и условия термообработки

Table. Amount of reducing agent and heat treatment conditions

Номер образца Sample number	Количество восстановителя, моль/моль CaSO ₄ Amount of reducing agent, mol/mol CaSO ₄	Температура термообработки Heat treatment temperature, °C	pH 10%-й суспензии pH of 10 % suspension
1	0,16	900	11,3
2	0,22		11,3
3	0,26		11,3
4	0,16	1000	12,3
5	0,22		12,2
6	0,26		11,6

В процессе термообработки основная составляющая фосфогипса – двухводный сульфат кальция CaSO₄·2H₂O – ступенчато (5), (6) дегидратируется с образованием безводного сульфата кальция CaSO₄.



На рис. 1 приведены результаты рентгенофазового анализа. Согласно полученным результатам, образец, термообработанный без восстановителя, представляет собой безводный сульфат кальция (PDF Number 010-74-2421, Calcium Sulfate), который образуется при дегидратации исходного сульфата кальция по реакциям (5), (6) (рис. 1, а).

Образец фосфогипса, подвергнутый термообработке в присутствии восстановителя, содержит сульфат кальция и оксид кальция (PDF Number 010-770-9574, Calcium Oxide). Присутствие восстановителя предположительно снижает температуру образования оксида кальция вследствие протекания реакции (7)



В [19] было установлено, что при избыточном количестве восстановителя протекает в основном реакция, описываемая уравнением (8), с образованием сульфида кальция.



СЭМ-изображения образцов приведены на рис. 2. Видно, что термообработка при температуре 1000 °С без восстановителя (рис. 2, а) приводит к формированию кристаллов пластинчатой формы. При термообработке в присутствии восстановителя (рис. 2, б) кристаллы теряют четкость, на их поверхности видны трещины, поры, которые могут быть связаны с частичной деструкцией материала.

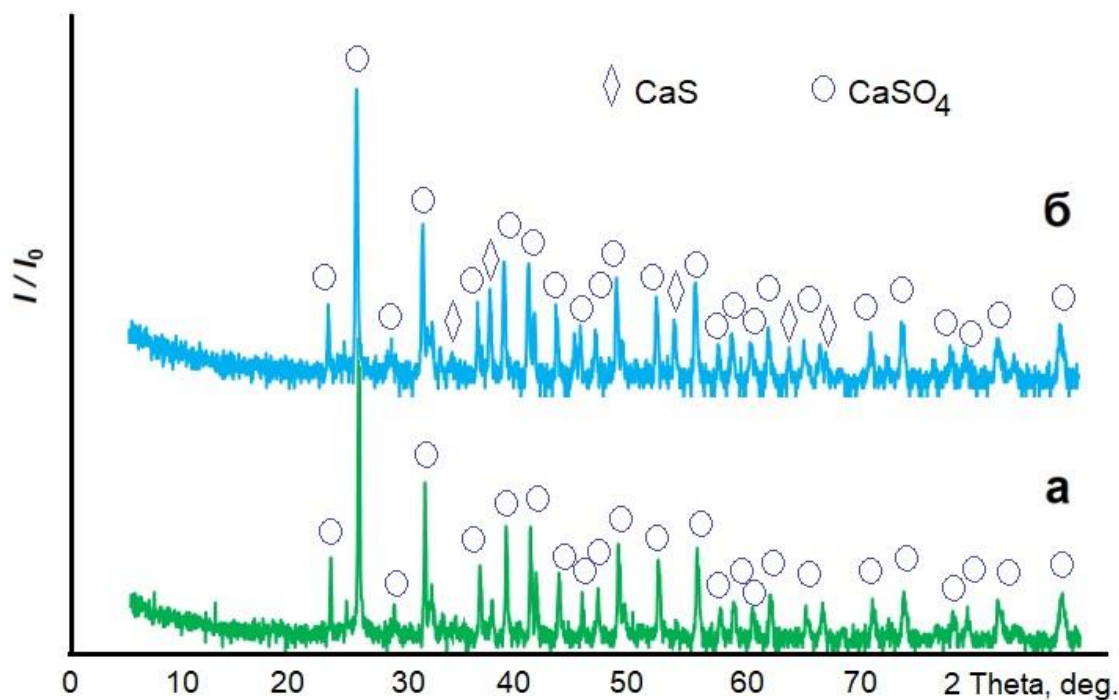


Рис. 1. Рентгенограмма образцов фосфогипса, термообработка при температуре 1000 °С: а) без восстановителя; б) в присутствии 0,16 моль восстановителя

Fig. 1. Radiograph of phosphogypsum samples, heat treatment at a temperature of 1000 °С: а) without reducing agent; б) with 0.16 mol of reducing agent

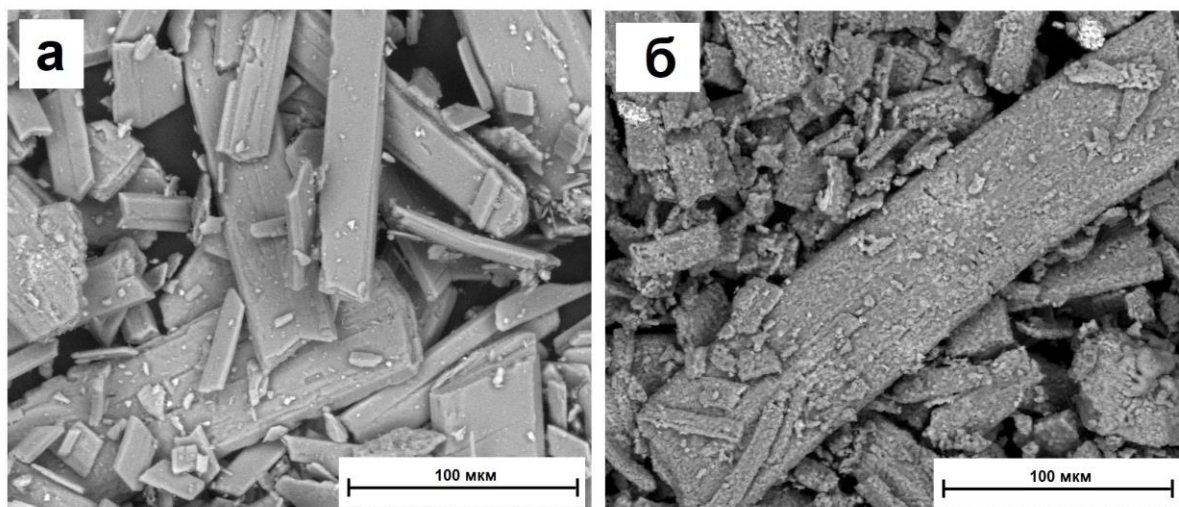


Рис. 2. СЭМ-изображения образцов фосфогипса, термообработанного при температуре 1000 °С без восстановителя (а) и в присутствии восстановителя (б)

Fig. 2. SEM images of phosphogypsum samples heat-treated at 1000 °С without a reducing agent (а) and with a reducing agent (б)

Термообработанные образцы фосфогипса были использованы для приготовления суспензий для обработки жидких отходов. Задачей исследования был выбор суспензии с наибольшим значением pH. В таблице и на рис. 3 приведены результаты эксперимента для 10%-й суспензии фосфогипса в воде.

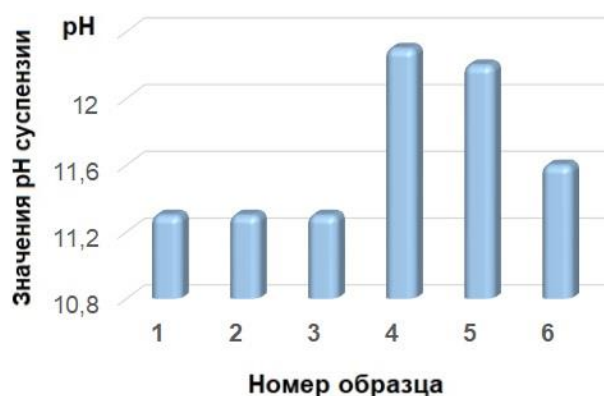


Рис. 3. Значения pH суспензии образцов фосфогипса, термообработанных в присутствии восстановителя. Нумерация образцов соответствует таблице

Fig. 3. pH values of the suspension of phosphogypsum samples heat-treated with a reducing agent. The numbering of the samples corresponds to the Table

Результаты эксперимента свидетельствуют о том, что суспензии всех образцов, термообработанных в присутствии восстановителя, имеют более высокое значение pH по сравнению с суспензией исходного фосфогипса той же концентрации. Интересным экспериментальным фактом является то, что значения кислотности (pH) суспензий всех образцов, подвергнутых термообработке при температуре 900 °С, оказались одинаковыми. Для образцов, термообработанных при температуре 1000 °С, значение pH суспензии уменьшается с увеличением количества введенного восстановителя. Полученный результат может быть связан с тем, что температура термообработки 900 °С приводит к образованию одинакового количества сульфида и оксида кальция по реакциям (7), (8). При температуре термообработки 1000 °С, по-видимому, при малом количестве введенного восстановителя преобладает реакция (7), с повышением количества восстановителя начинает параллельно протекать также реакция (8). Полученные данные хорошо согласуются с результатами исследований других научных групп [16, 20].

На рис. 4 приведены значения pH растворов с различной концентрацией введенного фосфогипса.

При увеличении содержания восстановленного фосфогипса значения pH раствора увеличиваются до значения 10 мас. %, а далее практически не из-

меняются. Можно считать, что введение 10 % фосфогипса в суспензию будет оптимальным.



Рис. 4. Значения pH суспензии фосфогипса с различным содержанием реагента

Fig. 4. pH values of phosphogypsum suspension with different reagent content

Таким образом, для дальнейшего использования в качестве реагента наиболее перспективным представляется образец № 4. В исследовании [21] в качестве перспективного подщелачивающего агента использован раствор, имеющий значения pH 10–12. В этой связи можно заключить, что разработанный способ позволяет получать реагент с улучшенными характеристиками. Оптимальными технологическими режимами будут: количество введенного восстановителя – 0,16 моль/моль CaSO_4 , температура термообработки 1000 °С.

Полученные результаты открывают широкие перспективы для разработки основ технологии переработки многотоннажных отходов химической промышленности – фосфогипса – для получения кальций-содержащего органоминерального удобрения. Попутно будет решаться проблема высвобождения площадей, занятых под отходы.

Заключение

Таким образом, проведено изучение процесса термообработки крупнотоннажного неорганического отхода химической промышленности – фосфогипса. Установлено, что суспензия термообработанного в присутствии восстановителя фосфогипса имеет повышенные значения водородного показателя, что может быть использовано для получения подщелачивающего реагента для обработки сельскохозяйственных отходов. Выявлены оптимальные технологические режимы получения реагента, имеющего максимальное значение pH суспензии: количество введенного восстановителя –

0,16 моль/моль CaSO_4 , температура термообработки 1000 °С.

Результаты исследований могут быть использованы для получения отечественных органоминеральных

кальций-содержащих удобрений. При этом попутно будет решаться проблема переработки крупнотоннажных твердых отходов.

СПИСОК ЛИТЕРАТУРЫ

1. Абдрахимов В.З., Абдрахимова Е.С. Использование алюмосодержащих отходов производства металлического хрома для создания кислотоупорных плиток // *Стекло и керамика*. – 2022. – Т. 95. – № 8. – С. 52–59. DOI: 10.14489/glc.2022.08.pp.052-059.
2. Кузин Е.Н., Кручинина Н.Е. Бруситсодержащие отходы производства огнеупорных материалов в процессах очистки сточных вод // *Стекло и керамика*. – 2022. – Т. 95. – № 7. – С. 58–63. DOI: 10.14489/glc.2022.07.pp.058-063.
3. Мурзин Н.В., Тальгамер Б.Л. Анализ структуры техногенных россыпей и оценка опыта их разработки // *Известия Томского политехнического университета. Инжиниринг георесурсов*. – 2023. – Т. 334. – № 2. – С. 147–153. DOI: <https://doi.org/10.18799/24131830/2023/2/3829>.
4. Шаповалов В.В., Козырь Д.А. Ресурсосберегающая технология утилизации породных отвалов горнодобывающих производств // *Известия Томского политехнического университета. Инжиниринг георесурсов*. – 2023. – Т. 334. – № 4. – С. 175–184. DOI: <https://doi.org/10.18799/24131830/2023/4/3965>.
5. Новиков А.С., Мостовщиков А.В., Сударев Е.А. Сравнительный анализ физико-химических методик переработки алюминиевых отходов // *Известия Томского политехнического университета. Инжиниринг георесурсов*. – 2023. – Т. 334. – № 4. – С. 53–61. DOI: <https://doi.org/10.18799/24131830/2023/4/3991>.
6. Переработка твердого остатка пиролиза автомобильных шин / Т.В. Бухаркина, С.В. Вержичинская, И.Г. Тарханова, А.В. Коновалов // *Известия Томского политехнического университета. Инжиниринг георесурсов*. – 2023. – Т. 334. – № 8. – С. 79–90. DOI: <https://doi.org/10.18799/24131830/2023/8/4017>.
7. Условия получения фосфогипса как отхода – побочного продукта производства азотно-фосфорных удобрений / А.В. Кочетков, Н.В. Щеголева, С.А. Коротковский, В.В. Талалай, Ю.Э. Васильев, И.Г. Шашков // *Интернет-журнал «Транспортные сооружения»*. – 2019. – № 2. DOI: 10.15862/01SATS219. URL: <https://t-s.today/PDF/01SATS219.pdf> (дата обращения: 15.11.2023).
8. In-situ remediation of phosphogypsum in a cement-free pathway: Utilization of ground granulated blast furnace slag and NaOH pretreatment / Q. Chen, S. Sun, Y. Wang, Q. Zhang, L. Zhu, Y. Liu // *Chemosphere*. – 2023. – Vol. 313. – № 137412.
9. Recycling phosphogypsum as a sole calcium oxide source in calcium sulfoaluminate cement and its environmental effects / S. Wu, X. Yao, C. Ren, Y. Yao, W. Wang // *Journal of Environmental Management*. – 2020. – Vol. 271. – № 110986. DOI: <https://doi.org/10.1016/j.jenvman.2020.110986>.
10. Use of untreated phosphogypsum as a raw material for autoclaved aerated concrete preparation / Y. Luo, B. Ma, F. Liang, Z. Xue, B. Qian, J. Wang, L. Zhou, J. Zang, R. Liang, Y. Li, Y. Hu // *Journal of Building Engineering*. – 2023. – Vol. 641. – № 105607.
11. Study on the mechanism and reaction characteristics of metal-supported phosphogypsum as oxygen carrier in a chemical looping gasification application / J. Yang, Y. Ren, S. Chen, J. Lu // *Journal of Environmental Sciences*. – 2024. – Vol. 138. – P. 428–438.
12. Chemical looping combustion of sulfur paste to SO_2 by phosphogypsum oxygen carrier for sulfur acid production / J. Ma, J. Xu, C. Liu, Q. Yi, M. Zheng, L. Cheng, T. Song // *Fuel*. – 2022. – Vol. 323. – № 124386.
13. Full-loop CFD simulation of lignite Chemical Looping Gasification with phosphogypsum as oxygen carrier using a circulating fluidized bed / W. Du, L. Ma, Q. Pan, Q. Dai, M. Zhang, X. Yin, X. Xiong, W. Zhang // *Energy*. – 2023. – Vol. 2621. – № 125451.
14. Use of an industrial by-product phosphogypsum in the production of white textured paints / Z. Valančius, R. Vaickelionienė, G. Vaickelionis, P. Makčinskis // *Journal of Cleaner Production*. – 2022. – Vol. 38020. – № 134888.
15. Enhanced removal of sulfonamide antibiotics from water by phosphogypsum modified biochar composite / Z. Jiang, M. Chen, X. Lee, Q. Feng, N. Cheng, X. Zhang, S. Wang, B. Wang // *Journal of Environmental Sciences (China)*. – 2023. – Vol. 130. – P. 174–186.
16. Reaction mechanism of thermal decomposition of Phosphogypsum / F. Laasri, A.C. Garcia, M. Latifi, J. Chaouki // *Waste Management*. – 2023. – Vol. 171. – P. 482–490.
17. Reduction of phosphogypsum to calcium sulfide (CaS) using metallic iron in a hydrochloric acid medium / M. Alla, A. Harrou, M.L. Elhafiany, D. Azerkane, M.E. Ouahabi, E.K. Gharibi // *Phosphorus, Sulfur, and Silicon and the Related Elements*. – 2022. – Vol. 197. – Iss. 10. – P. 1026–1035. DOI: <https://doi.org/10.1080/10426507.2022.2052881>.
18. Синтез сульфида кальция из фосфогипса / Н.П. Шабельская, О.А. Меденников, А.Н. Яценко, В.А. Таранушич, Ю.А. Гайдукова, М.Н. Астахова, В.А. Ульянова // *Известия высших учебных заведений. Северо-Кавказский регион. Технические науки*. – 2020. – № 4 (208). – С. 63–67.
19. Меденников О.А., Шабельская Н.П. Технология переработки фосфогипса в люминесцентный краситель на основе сульфида кальция // *Тонкие химические технологии*. – 2022. – Т. 17. – № 4. – С. 357–368.
20. Ангидритовые вяжущие из фосфогипса и доломита / А.А. Сагындыков, Б.А. Нурлыбаев, Н.Т. Карабаев, А.К. Медетов // *Механика и технологии. Научный журнал*. – 2022. – № 1 (75). – С. 71–77. DOI: <https://doi.org/10.55956/DIOB2736>.
21. Способ подготовки сточных вод для сельскохозяйственного использования: пат. 2683759 Российская Федерация, МПК C02F 1/52, C05F 3/02, C05F 7/00, C02F 103/20, № 2018119414; заявл. 25.05.2018; опубл. 01.04.2019, Бюл. № 10.

Сведения об авторах

Даниил Иванович Монастырский, ассистент кафедры экологии и промышленной безопасности, Южно-Российский государственный политехнический университет (НПИ) имени М.И. Платова, Россия, 346428, г. Новочеркасск, ул. Просвещения, 132. monastirskiy_di@npi-tu.ru

Марина Анатольевна Куликова, доцент, кандидат технических наук, доцент кафедры экологии и промышленной безопасности, Южно-Российский государственный политехнический университет (НПИ) имени М.И. Платова, Россия, 346428, г. Новочеркасск, ул. Просвещения, 132. <https://orcid.org/0000-0003-4000-0040>; m.kulikova@npi-tu.ru

Нина Петровна Шабельская, доктор технических наук, доцент, заведующая кафедрой экологии и промышленной безопасности, Южно-Российский государственный политехнический университет (НПИ) имени М.И. Платова, Россия, 346428, г. Новочеркасск, ул. Просвещения, 132. <https://orcid.org/0000-0001-8266-2128>; n.shabelskaya@npi-tu.ru

Вера Андреевна Ульянова, магистрант кафедры экологии и промышленной безопасности, Южно-Российский государственный политехнический университет (НПИ) имени М.И. Платова, Россия, 346428, г. Новочеркасск, ул. Просвещения, 132. npi-20@yandex.ru

Марина Александровна Егорова, кандидат технических наук, доцент кафедры экологии и промышленной безопасности, Южно-Российский государственный политехнический университет (НПИ) имени М.И. Платова, Россия, 346428, г. Новочеркасск, ул. Просвещения, 132. <https://orcid.org/0000-0003-2939-5141>; m.egorova@npi-tu.ru

Поступила в редакцию: 02.12.2023

Поступила после рецензирования: 09.04.2024

Принята к публикации: 09.09.2024

REFERENCES

1. Abdrakhimov V.Z., Abdrakhimova E.S. The use of aluminum-containing waste from the production of metallic chromium to create acid-resistant tiles. *Glass and ceramics*, 2022, vol. 95, no. 8, pp. 52–59. (In Russ.) DOI: 10.14489/glc.2022.08.pp.052-059.
2. Kuzin E.N., Kruchinina N.E. Brucite-containing waste products of refractory materials in wastewater treatment processes. *Glass and ceramics*, 2022, vol. 95, no. 7, pp. 58–63. (In Russ.) DOI: 10.14489/ glc.2022.07.pp.058-063.
3. Murzin N.V., Talgamer B.L. Analysis of the structure of technogenic placers and evaluation of their development experience. *Bulletin of the Tomsk Polytechnic University. Geo Assets Engineering*, 2023, vol. 334, no. 2, pp. 147–153. (In Russ.) DOI: <https://doi.org/10.18799/24131830/2023/2/3829>
4. Shapovalov V.V., Kozyr D.A. Resource-saving technology for utilization of waste dumps of mining industries. *Bulletin of the Tomsk Polytechnic University. Geo Assets Engineering*, 2023, vol. 334, no. 4, pp. 175–184. (In Russ.) DOI: <https://doi.org/10.18799/24131830/2023/4/3965>
5. Novikov A.S., Mostovshchikov A.V., Sudarev E.A. Comparative analysis of physico-chemical methods for processing aluminum waste. *Bulletin of the Tomsk Polytechnic University. Geo Assets Engineering*, 2023, vol. 334, no. 4, pp. 53–61. (In Russ.) DOI: <https://doi.org/10.18799/24131830/2023/4/3991>
6. Bukharkina T.V., Verzhichinskaya S.V., Tarkhanova I.G., Konovalov A.V. Recycling of solid residue of pyrolysis of car tires. *Bulletin of the Tomsk Polytechnic University. Geo Assets Engineering*, 2023, vol. 334, no. 8, pp. 79–90. (In Russ.) DOI: <https://doi.org/10.18799/24131830/2023/8/4017>
7. Kochetkov A.V., Shchegoleva N.V., Korotkovsky S.A., Talalai V.V., Vasiliev Yu.E., Shashkov I.G. Conditions for obtaining phosphogypsum as a waste by-product of the production of nitrogen-phosphorus fertilizers. *Online magazine "Transport facilities"*, 2019, no. 2. (In Russ.) DOI: 10.15862/01SATS219. Available at: <https://t-s.today/PDF/01SATS219.pdf> (accessed 15 November 2023).
8. Chen Q., Sun S., Wang Y., Zhang Q., Zhu L., Liu Y. In-situ remediation of phosphogypsum in a cement-free pathway: Utilization of ground granulated blast furnace slag and NaOH pretreatment. *Chemosphere*, 2023, vol. 313, no. 137412.
9. Wu S., Yao X., Ren C., Yao Y., Wang W. Recycling phosphogypsum as a sole calcium oxide source in calcium sulfoaluminate cement and its environmental effects. *Journal of Environmental Management*, 2020, vol. 271, no. 110986. DOI: <https://doi.org/10.1016/j.jenvman.2020.110986>.
10. Luo Y., Ma B., Liang F., Xue Z., Qian B., Wang J., Zhou L., Zang J., Liang R., Li Y., Hu Y. Use of untreated phosphogypsum as a raw material for autoclaved aerated concrete preparation. *Journal of Building Engineering*, 2023, vol. 641, no. 105607.
11. Yang J., Ren Y., Chen S., Lu J. Study on the mechanism and reaction characteristics of metal-supported phosphogypsum as oxygen carrier in a chemical looping gasification application. *Journal of Environmental Sciences*, 2024, vol. 138, pp. 428–438.
12. Ma J., Xu J., Liu C., Yi Q., Zheng M., Cheng L., Song T. Chemical looping combustion of sulfur paste to SO₂ by phosphogypsum oxygen carrier for sulfur acid production. *Fuel*, 2022, vol. 323, no. 124386.
13. Du W., Ma L., Pan Q., Dai Q., Zhang M., Yin X., Xiong X., Zhang W. Full-loop CFD simulation of lignite Chemical Looping Gasification with phosphogypsum as oxygen carrier using a circulating fluidized bed. *Energy*, 2023, vol. 2621, no. 125451.
14. Valančius Z., Vaickelionienė R., Vaickelionis G., Makčinskas P. Use of an industrial by-product phosphogypsum in the production of white textured paints. *Journal of Cleaner Production*, 2022, vol. 38020, no. 134888.
15. Jiang Z., Chen M., Lee X., Feng Q., Cheng N., Zhang X., Wang S., Wang B. Enhanced removal of sulfonamide antibiotics from water by phosphogypsum modified biochar composite. *Journal of Environmental Sciences (China)*, 2023, vol. 130, pp. 174–186.

16. Laasri F., Garcia A.C., Latifi M., Chaouki J. Reaction mechanism of thermal decomposition of Phosphogypsum. *Waste Management*, 2023, vol. 171, pp. 482–490.
17. Alla M., Harrou A., Elhafiany M.L., Azerkane D., Ouahabi M.E., Gharibi E.K. Reduction of phosphogypsum to calcium sulfide (CaS) using metallic iron in a hydrochloric acid medium. *Phosphorus, Sulfur, and Silicon and the Related Elements*, 2022, vol. 197, no. 10, pp. 1026–1035. DOI: <https://doi.org/10.1080/10426507.2022.2052881>.
18. Shabelskaya N.P., Medennikov A.A., Yatsenko A.N., Taranushich V.A., Gaidukova Yu.A., Astakhova M.N., Ulyanova V.A. Synthesis of calcium sulfide from phosphogypse. *Izvestia of higher educational institutions. North Caucasus region. Technical sciences*, 2020, no. 4 (208), pp. 63–67. (In Russ.)
19. Medennikov O.A., Shabelskaya N.P. Technology of processing phosphogypse into a luminescent dye based on calcium sulfide. *Fine chemical technologies*, 2022, vol. 17, no. 4, pp. 357–368. (In Russ.)
20. Sagyndykov A.A., Nurlybaev B.A., Karabaev N.T., Medetov A.K. Anhydrite binders made of phosphogypse and dolomite. *Mechanics and Technologies. Scientific Journal*, 2022, no. 1 (75), pp. 71–77. (In Russ.) DOI: <https://doi.org/10.55956/DIOB2736>.
21. Kolesnikova T.A., Kulikova M.A., Gribut E.A., Surzhko O.A. *Method of waste water treatment for agricultural use*. Patent RF, no. 2683759, 2019. (In Russ.)

Information about authors

Daniil I. Monastyrsky, Assistant, Platov South-Russian State Polytechnic University (NPI), 132, Prosveshcheniya street, Novocherkassk, 346428, Russian Federation. monastirskiy_di@npi-tu.ru

Marina A. Kulikova, Cand. Sc., Associate Professor, Platov South-Russian State Polytechnic University (NPI), 132, Prosveshcheniya street, Novocherkassk, 346428, Russian Federation. <https://orcid.org/0000-0003-4000-0040>; m.kulikova@npi-tu.ru

Nina P. Shabelskaya, Dr. Sc., Associate Professor, Head of the Ecology and Industrial Safety Department, Platov South-Russian State Polytechnic University (NPI), 132, Prosveshcheniya street, Novocherkassk, 346428, Russian Federation. <https://orcid.org/0000-0001-8266-2128>; n.shabelskaya@npi-tu.ru

Vera A. Ulyanova, Master's Degree Student, Platov South-Russian State Polytechnic University (NPI), 132, Prosveshcheniya street, Novocherkassk, 346428, Russian Federation. npi-20@yandex.ru

Marina A. Egorova, Cand. Sc., Associate Professor, Platov South-Russian State Polytechnic University (NPI), 132, Prosveshcheniya street, Novocherkassk, 346428, Russian Federation. <https://orcid.org/0000-0003-2939-5141>; m.egorova@npi-tu.ru

Received: 02.12.2023

Revised: 09.04.2024

Accepted: 09.09.2024

УДК 550.382:551.763.1 (571.1)
DOI: 10.18799/24131830/2024/9/4672
Шифр специальности ВАК: 1.6.9

Магнитостратиграфия верхнеюрских и нижнемеловых отложений Большехетской структурной террасы

А.Ю. Колмаков^{1✉}, В.П. Меркулов², А.С. Семенова¹, Е.Н. Осипова²

¹ Национальный исследовательский Томский государственный университет, Россия, г. Томск

² Национальный исследовательский Томский политехнический университет, Россия, г. Томск

✉ antokolmakov@mail.ru

Аннотация. *Актуальность* исследования обусловлена приуроченностью месторождений углеводородов к определенным стратиграфическим горизонтам, слабой изученностью северо-востока Западной Сибири и сопредельных территорий, в том числе и магнитостратиграфическим методом, при их потенциальной нефтегазоносности (за последние 10 лет здесь открыты четыре уникальных по запасам месторождения углеводородов), бореальным характером отложений и необходимостью их магнитостратиграфических корреляций. *Цель:* создать опорный магнитостратиграфический разрез северо-востока Западной Сибири. *Объекты:* разрезы глубоких скважин Пендомаяхской, Восточно-Сузунской, Восточно-Лодочной и Горчинской площадей Большехетской структурной террасы, вскрывших нижнемеловые и верхние части верхнеюрских (яновстанская свита) отложений. *Методы.* Палеомагнитные исследования проводились по стандартным методикам и включали в себя отбор образцов керн с ориентацией «верх-низ», пробоподготовку (каппаметрия, разметка образцов, фотографирование, распиловка), временную чистку (неделю образцы лежали по полю, неделю – против поля с определением остаточной намагниченности), полное размагничивание переменным магнитным полем, построение графиков полного размагничивания, массовую чистку, определение компонентов естественной остаточной намагниченности, оценку палеомагнитной стабильности, выявление зон прямой и обратной полярности, построение палеомагнитных разрезов. Для построения магнитостратиграфических разрезов, приведенных в данной статье, произведена увязка палеомагнитных и биостратиграфических данных. Для этого были выявлены магнитохроны с помощью биостратиграфического анализа. *Результаты.* Составлен сводный магнитостратиграфический разрез пограничных юрско-меловых отложений Большехетской структурной террасы, выявлено четыре магнитозоны с подзонами прямой и обратной полярности, сопоставленные с зональной аммонитовой шкалой берриаса. Отмечена высокая информативность результатов магнитостратиграфических исследований в бореальных условиях.

Ключевые слова: граница между юрскими и меловыми отложениями, магнитостратиграфия, биостратиграфия, расчленение и корреляция разрезов, Большехетская структурная терраса, Западная Сибирь

Для цитирования: Магнитостратиграфия верхнеюрских и нижнемеловых отложений Большехетской структурной террасы / А.Ю. Колмаков, В.П. Меркулов, А.С. Семенова, Е.Н. Осипова // Известия Томского политехнического университета. Инжиниринг георесурсов. – 2024. – Т. 335. – № 9. – С. 191–202. DOI: 10.18799/24131830/2024/9/4672

UDC 550.382:551.763.1 (571.1)
DOI: 10.18799/24131830/2024/9/4672

Magnetostratigraphy of the Upper Jurassic and Lower Cretaceous deposits of the Bolshekhetskaya structural terrace

A.Yu. Kolmakov^{1✉}, V.P. Merkulov², A.S. Semenova¹, E.N. Osipova²

¹ National Research Tomsk State University, Tomsk, Russian Federation

² National Research Tomsk Polytechnic University, Tomsk, Russian Federation

✉ antokolmakov@mail.ru

Abstract. Relevance. The confinement of hydrocarbon deposits to certain stratigraphic horizons, poor knowledge of the northeast of Western Siberia and adjacent territories, including the magnetostratigraphic method, with their oil and gas potential (over the past 10 years, four unique hydrocarbon deposits have been discovered here), the boreal nature of the deposits, and the need for remote magnetostratigraphic correlations. **Aim.** To create a magnetostratigraphic reference section of the northeast of Western Siberia. **Objects.** Sections of deep wells of the Pedomayakhskaya, Vostochno Suzunskaya, Vostochno Lodochnaya and Gorchinskaya areas of the Bolshekhetskaya structural terrace, which exposed the Lower Cretaceous and upper parts of the Upper Jurassic (Yanovstan Formation) deposits. **Methods.** Paleomagnetic studies were carried out according to standard methods and included sampling of core samples with an "up-down" orientation, sample preparation (kappametry, marking of samples, photographing, sawing), measurement of magnetic susceptibility, temporary cleaning (the samples were located along the field during a week, then a week-against the field with determination of residual magnetization), complete demagnetization by alternating magnetic field, plotting of complete demagnetization, mass cleaning, determination of components of natural residual magnetization, assessment of paleomagnetic stability, identification of forward and reverse polarity zones, construction of paleomagnetic sections. To construct the magnetostratigraphic sections given in this article, the paleomagnetic and biostratigraphic data are linked. For this purpose, magnetochrons were identified using biostratigraphic analysis. **Results.** The authors have compiled a composite magnetostratigraphic section of the boundary Jurassic-Cretaceous deposits of the Bolshekhetskaya structural terrace and identified four magnetozones with subzones of direct and reverse polarity, compared with the Berriasian ammonite scale. The high information content of the results of magnetostratigraphy research under boreal conditions was noted.

Keywords: Jurassic-Cretaceous boundary, magnetostratigraphy, biostratigraphy, subdivision and correlation of sections, Bolshekhetskaya structural terrace, Western Siberia

For citation: Kolmakov A.Yu., [Merkulov V.P.], Semenova A.S., Osipova E.N. Magnetostratigraphy of the Upper Jurassic and Lower Cretaceous deposits of the Bolshekhetskaya structural terrace. *Bulletin of the Tomsk Polytechnic University. Geo Assets Engineering*, 2024, vol. 335, no. 9, pp. 191–202. DOI: 10.18799/24131830/2024/9/4672

Введение

Западно-Сибирская нефтегазоносная провинция (НГП) является уникальным геологическим образованием. Кроме огромных запасов углеводородов (УВ), она характеризуется закономерным изменением в латеральном направлении мощности нефтематеринской баженовской свиты, в субмеридиальном направлении – фазового состава и степени концентрирования УВ, возраста вмещающих осадочных пород и др.

В южной части Западной Сибири преобладают небольшие преимущественно нефтяные месторождения, локализованные в юрских отложениях и на юго-востоке Западно-Сибирской НГП в доюрском фундаменте. Самые северные территории преимущественно газовые, как правило, в меловых отложениях, с уникальными по запасам месторождениями и самой высокой степенью концентрированности этих запасов. По состоянию на 1994 г. на севере Западной Сибири «77,9 % разведанных запасов газа содержится в 18 уникальных месторождениях» из 40 открытых [1].

В результате интенсивной разработки месторождений к настоящему времени в них остались в основном трудно извлекаемые запасы (ТриЗ), требующие для извлечения УВ из скважин специальные технологии, дополнительные ассигнования и временные затраты.

В случае долгосрочной перспективы в нефтяной и газовой отраслях обозначаются свои приоритетные направления восполнения минерально-сырьевой базы России. В нефтяной отрасли это, конечно, всестороннее изучение нефтематеринской

баженовской свиты как носителя сланцевой нефти, геофизического репера [2, 3]. Приоритетным направлением в газовой отрасли являются поиски новых месторождений в слабо изученной шельфовой части и на прилегающей суше Арктической зоны Западной Сибири [4]. За последнее десятилетие именно здесь было открыто четыре уникальных по запасам УВ месторождения. Продвижение поисковых работ в северном направлении определяет востребованность информации о стратиграфической, в том числе и магнитостратиграфической, корреляции осадочных толщ.

Большехетская структурная терраса в геофизических полях

Большехетская структурная терраса с локализованными в ней Лодочным, Ванкорским и Сузунским месторождениями УВ располагается в северо-восточной части Западно-Сибирской НГП. Большехетская структурная терраса и прилегающие территории севера Западной Сибири слабо изучены глубоким бурением, поэтому значительная часть геологической информации получена с использованием результатов интерпретации геофизических материалов, прежде всего сейсморазведки.

На рис. 1 представлена структурная карта зоны сочленения Гыданской нефтегазоносной области (НГО) Западно-Сибирской НГП и Енисей-Хатангской НГО Лено-Тунгусской НГП по отражающему горизонту М (кровля малохетской свиты, нижний мел, апт) [5–7]. Основанием же наиболее продуктивного (в регионе) неокомского (берриас-нижнеаптского) мегакомплекса является отражаю-

щий горизонт Б. На основной части Западной Сибири это баженовская свита, в рассматриваемом регионе, в том числе и в пределах Большехетской структурной террасы, – это яновстанская свита. Яновстанская свита, в отличие от своего временного аналога, более мощная и отличается ухудшением отражательной способности сейсмических волн.

Из надпорядковых тектонических элементов по отражающему горизонту М наиболее ярко, интенсивной отрицательной аномалией, выделяется Большехетская мегасинеклиза (рис. 2), ограниченная с севера Мессояхской грядой поднятий, а с востока – Большехетской структурной террасой. Характерные для пород неокомского мегакомплекса клиноформные структуры обнаруживаются по сейсмическим данным преимущественно к северу от Мессояхской гряды. На месторождениях Большехетской структурной террасы по сейсмическим данным клиноформы не обнаруживаются и отложения нижнехетской и суходудинской свит представлены плоскопараллельными шельфовыми пластами. По сейсмическим данным нет клиноформ и в Таймырской антеклизе. Отсутствие клиноформ представляется благоприятным условием для использования магнитостратиграфических исследований для корреляции осадочных отложений на больших территориях, так называемых удаленных корреляций. Большехетская мегавпадина, локальные поднятия Большехетской структурной террасы и Таймырской антеклизы образовались преимущественно в постсеноманский период.

Ценную информацию о расположении месторождений УВ в регионе можно получить также из результатов аэрогеофизических исследований гравитационного и магнитного полей [8]. Оба метода отображают преимущественно физические неоднородности фундамента: гравиразведка, потому что это самый глубинный метод (из методов потенциальных полей) и граница «осадочный чехол – фундамент» самая градиентная по плотности; магниторазведка, потому что осадочный чехол практически немагнитный для аэросъемки и значимые для аэросъемки петромагнитные неоднородности локализованы в фундаменте. Отметим следующие выявленные закономерности.

Аномалии магнитного и гравитационного полей хорошо согласуются между собой. Наиболее интенсивной линейной аномальной зоной отображается Уренгойско-Колготорский грабен-рифт, пересекающий всю Западносибирскую НГП в субмеридианальном направлении. Простирание и геофизическое отображение грабен-рифта резко меняется севернее 63° широты.

Грабен-рифт смещается в западном направлении, в аэрогеофизических полях отображаются места локализации гигантских и уникальных по запасам месторождений УВ. В магнитном поле это отрица-

тельная магнитная аномалия, обрамленная сложной положительной аномалией. В гравитационном поле эта часть грабен-рифта отмечается масштабной отрицательной аномалией с локальным минимумом 10 мГал, соответствующим положению Уренгойского месторождения. Поскольку сейсмические данные указывают на повышение поверхности фундамента здесь и в подобных случаях Западной Сибири, то Уренгойскую отрицательную гравитационную аномалию следует рассматривать как субвертикальную зону разуплотнения.

Она же является центром кольцевой структуры из гигантских и уникальных по запасам месторождений – Медвежье, Ямбург, Заполярное и др. По магнитному полю эта структура несколько асимметрична. В восточном направлении увеличивается доля и интенсивность положительных магнитных аномалий, а также доля нефти в составе месторождений УВ. Заполярное месторождение, расположенное к востоку от Уренгоя, образует собственную кольцевую структуру меньшего порядка, пересечение которой с отражающимся в геофизических полях субмеридианальным нарушением предположительно рифтогенной природы соответствует месту локализации месторождения Ванкор в пределах Большехетской структурной террасы. Ванкор отличается от Заполярного месторождения понижением интервала нефтегазоносности, запасов УВ и значительным увеличением в них доли нефти. Выявляемые глубинными геофизическими методами линейные и кольцевые образования отображаются в рельефе дневной поверхности Большехетской структурной террасы, на что указывают результаты интерпретации материалов мультиспектральных космических съемок [9].

Магнитостратиграфия.

Методика палеомагнитных исследований

Магнитостратиграфия – самостоятельное научное направление в составе стратиграфии, имеющее собственные предмет (векторы естественной остаточной намагниченности горных пород), объект (магнитозоны) и метод (палеомагнитный) исследования, который базируется «на представлении о планетарном процессе развития главного магнитного поля как части общей эволюции Земли» [10].

Согласно Стратиграфическому кодексу России [11] магнитостратиграфия по принципу обоснования включает в себя два подразделения: магнитополярные и магнитные.

Магнитополярные подразделения основаны на временных изменениях геомагнитного поля (инверсии, экскурсы), планетарно изохронны, но их распознавание требует комплексирования с биостратиграфическими методами. В комплексном варианте магнитостратиграфии доступны удаленные корреляции, в том числе и в бореальных областях.

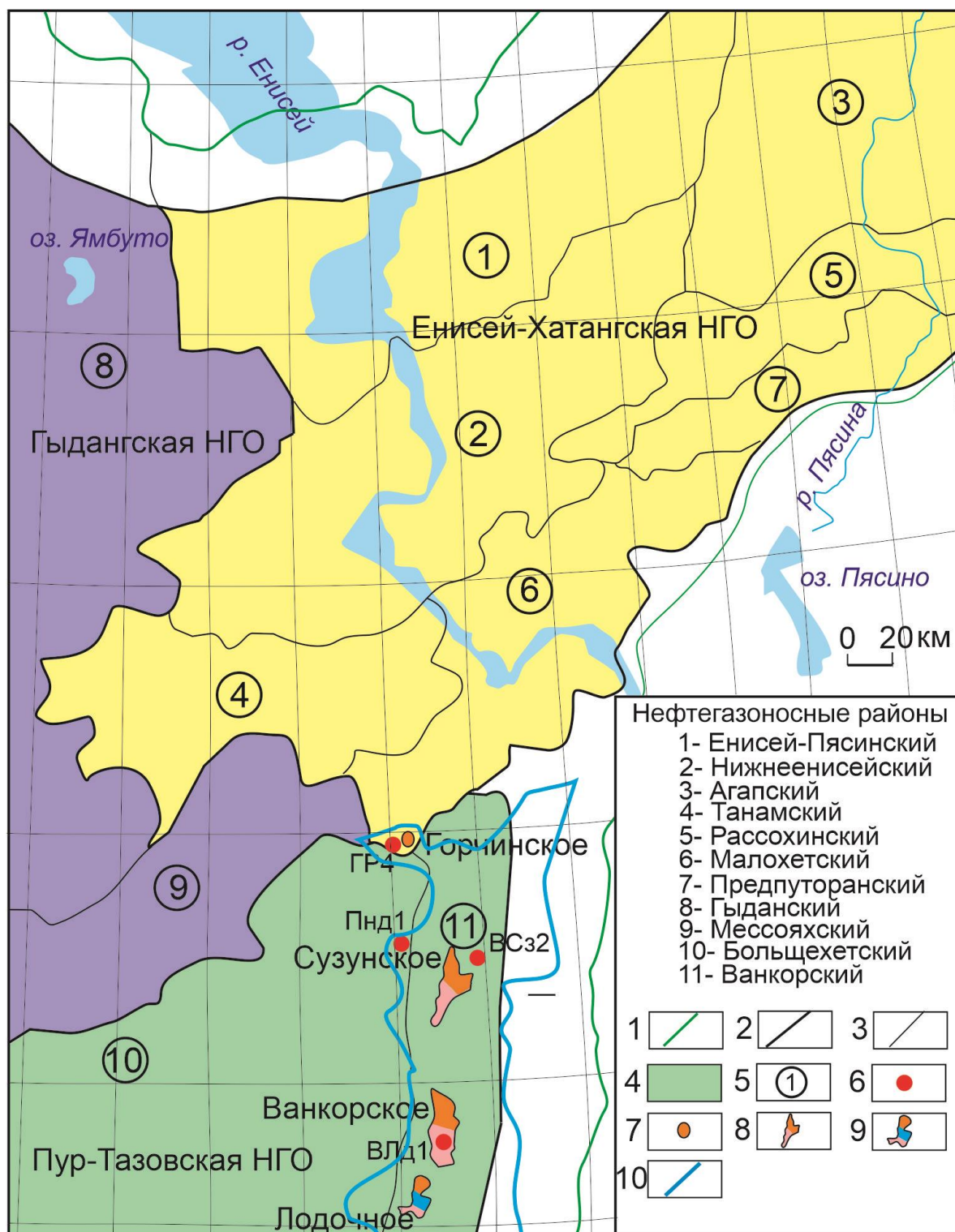


Рис. 1. Схема нефтегазогеологического районирования исследуемой территории [5–7]: 1 – границы перспективных земель; 2 – границы нефтегазоносной области (НГО); 3 – границы нефтегазоносных районов (НГР); 4 – окрас НГО; 5 – номера НГР; 6 – изученные скважины: ГР4 – Горчинская 4, VSz2 – Восточно-Сузунская 2, Пнд1 – Пендомаяхская 1 и ВЛд1 – Восточно-лодочная 1, 7–9 – месторождения УВ: газовые (7), газо-нефтяные (8) и нефтегазоконденсатные (9); 10 – граница Большехетской структурной террасы

Fig. 1. Diagram of oil and gas geological zoning of the studied territory [5–7]: 1 – boundaries of prospective lands; 2 – boundaries of the oil and gas-bearing region (OGR); 3 – boundaries of the oil and gas-bearing district (OGD); 4 – OGR color; 5 – OGD numbers; 6 – wells studied: GR4 – Gorchinskaya 4, VSz2 – Vostochno-Suzunskaya 2, Pnd1 – Pendomayakhskaya 1 and VLd1 – Vostochno Lodochnaya 1, 7–9 – hydrocarbon fields: gas (7), gas-oil (8) and condensate gas-oil (9); 10 – boundary of the Bolshekhetskaya structural terrace

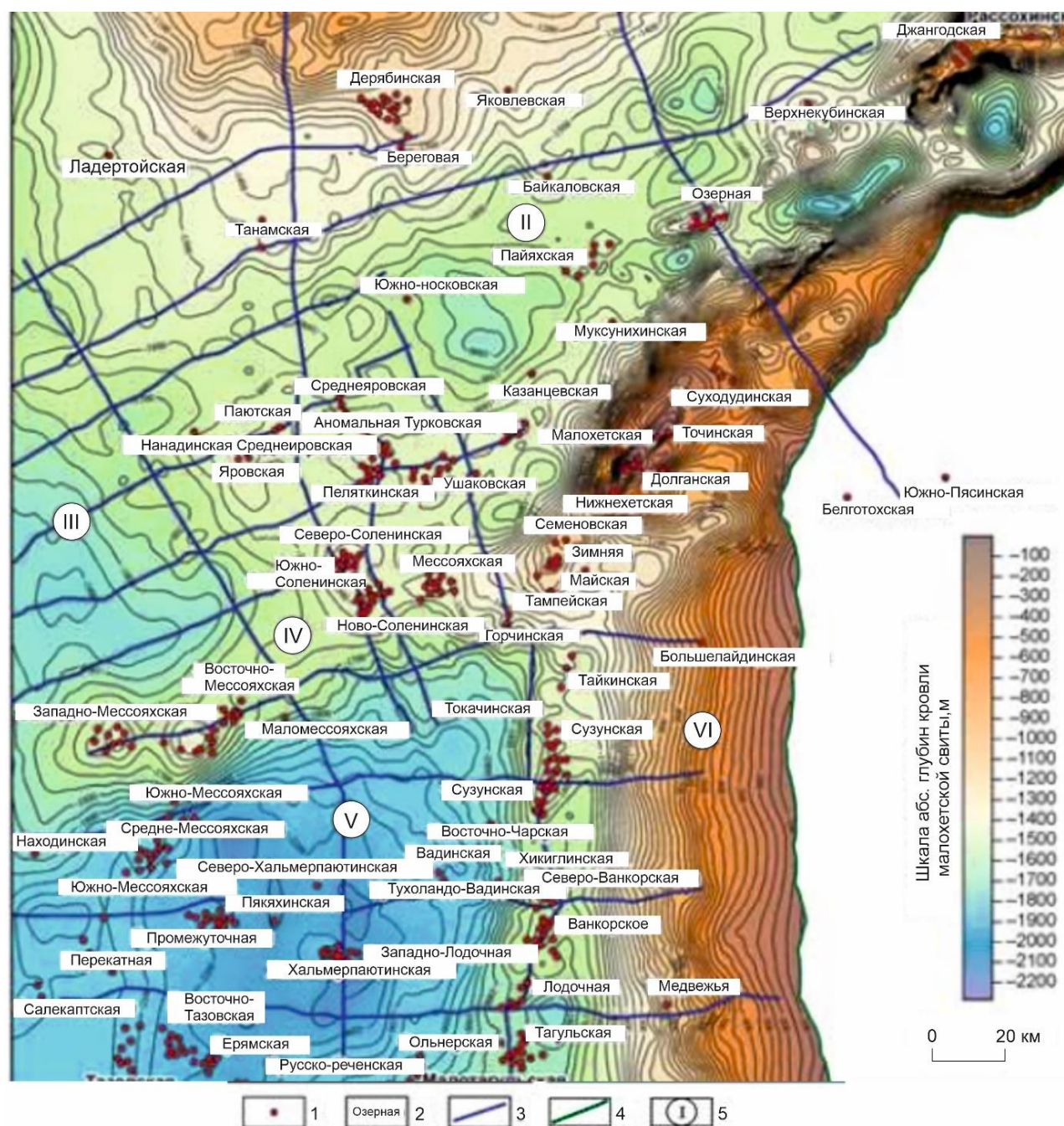


Рис. 2. Структурная карта исследуемого региона по кровле малохетской свиты [5]: 1 – поисковые и разведочные скважины; 2 – названия площадей; 3 – сейсмические профили МОГТ; 4 – граница зоны выклинивания малохетской свиты; 5 – надпорядковые тектонические элементы: II – Таймырская антеклиза, III – Антипаютинско-Тадеебахинская синеклиза, IV – Мессояхская гряда, V – Большехетская мегасинеклиза, VI – Предъенисейская мегамоноклиналь

Fig. 2. Structural map of the study region for the roof of the Malokhetskaya Formation [5]: 1 – search and exploration wells; 2 – area names; 3 – seismic profiles of method CDP (common depth point method); 4 – boundary of the pinching-out zone of the Malokhetskaya Formation; 5 – supra-order tectonic elements: II – Taimyr anteklise, III – Antipayutinsko-Tadebeyakha syneklise, IV – Messoyakha ridge, V – Bolshekhetskaya megasyneclise, VI – Predyeniseiskaya megamono-cline

Магнитные подразделения выделяются по совокупности численных магнитных свойств – магнитной восприимчивости, остаточной намагниченности и др. Наиболее информативны численные маг-

нитные свойства в случае осадочных комплексов. В осадочных горных породах первичной является ориентационная остаточная намагниченность, отличающаяся аномально низкими значениями оста-

точной намагниченности (фактор Кенигсбергера меньше единицы). По этому признаку можно выделять образцы с вторичными изменениями.

Методика палеомагнитных исследований включает в себя: выбор объектов исследования, отбор образцов, их магнитную чистку, определение компонентного состава естественной остаточной намагниченности (ЕОН) [12–20].

Большехетская структурная терраса занимает удачное положение на северо-востоке Западносибирской НГП (рис. 1), которое позволяет проводить удаленные корреляции и на приарктические территории, и в центральные части НГП, вмещает уникальное по запасам УВ Ванкорское месторождение. Выбраны скважины Пендомаяхская 1, Восточно-Сузунская 2, Горчинская 4 и Восточно-Лодочная 1, вскрывшие исследуемый верхнеюрский-нижнемеловой интервал разреза, хорошо палеонтологически охарактеризованный.

Отбор образцов производился из интервалов нижнехетской и яновстанской свит по данным капаметрии с хорошо выраженными магнитными свойствами. Образцы ориентированы «верх–низ». Из каждого образца керна выпиливались по два кубика с ребром 2 см, и задавалась система координат. Всего отобрано 200 образцов.

Первичные исследования образцов заключались в измерении их естественной остаточной намагниченности с помощью рок-генератора JR-6A. На каждом образце проводилось три независимых измерения. По результатам измерений модуль ЕОН большинства образцов резко понижен, что является обычным явлением для осадочных комплексов с ориентационной ЕОН. Отклонение от этой закономерности может быть вызвано вторичными процессами.

В составе ЕОН можно выделить следующие компоненты:

- «лабораторная вязкая намагниченность», которая удаляется с помощью временной магнитной чистки;
- «естественная вязкая намагниченность», вызванная длительным нахождением породы в земном магнитном поле, выявляется в процессе размагничивания переменным магнитным полем, может быть использована для ориентировки керна [21];
- «первичная остаточная намагниченность», сформированная при образовании породы и сохранившая информацию о полярности геомагнитного поля времени образования, выделяется как наиболее стабильный компонент при размагничивании переменным магнитным полем;
- «вторичная остаточная намагниченность» может быть выявлена по увеличению значения фактора Кенигсбергера [22].

Размагничивание переменным магнитным полем производилось устройством LDA-3A. Полное размагничивание эталонных образцов показало

присутствие в составе ЕОН минимум двух компонентов [23]. Относительно нестабильный компонент, который разрушается при значениях переменного магнитного поля до 20–30 мТл, характеризуется высокими значениями наклонов и соответствует вязкой остаточной намагниченности. Первичный компонент ЕОН выделяется в переменном магнитном поле 30–40 мТл и может сохраняться до 60 мТл и более, отличается знакопеременным наклоном в диапазоне 30–60° и низкими палеомагнитными кучностями. Кроме низких значений ЕОН доказательством ее первичности может служить независимость геомагнитных инверсий от вариаций литологического, петрофизического и иного вещественного состава пород и схожесть палеомагнитной структуры одновозрастных образований в удаленных областях. Достоверность выделения палеомагнитной зоны подтверждалось тремя и более последовательно отобранными образцами.

Магнитостратиграфический разрез верхнеюрских и нижнемеловых отложений Большехетской структурной террасы

Для построения магнитостратиграфических разрезов необходима увязка палеомагнитных и биостратиграфических данных. Были привлечены опубликованные материалы, в которых решаются проблемы границы юры и мела [6, 24–32]. В первую очередь, это работа по стратиграфическим исследованиям верхнеюрских-нижнемеловых отложений Большехетской структурной террасы [6]. В ней приводятся результаты биостратиграфических исследований керна девяти глубоких скважин. Определения макрофаунистических остатков (двустворки и аммониты) выполнены А.Н. Алейниковым, определения микрофауны (фораминиферы) выполнены А.С. Семеновым.

Отложения нижней части берриасского яруса яновстанской свиты (K_1) охарактеризованы двустворчатыми моллюсками *Buchia* – представителями морского мелководья. В разрезе скважины Восточно-Лодочная 1 это *b*-слои с *Buchia unschensis* (верхняя часть слоев). Принадлежность яновстанской свиты к баженовскому горизонту Западной Сибири указывает также на бореальные условия ее образования [33].

В отложениях берриаса нижнехетской свиты (K_1) в разрезах всех скважин установлена фораминиферо-вая зона *Gaudryina gerkei*, *Trochammina rosaceaformis* KF1. В разрезе скважины Восточно-Сузунская 2 по аммонитам установлены две смежные зоны: *Nesutoroceras kochi* и *Surites icenii*, относящиеся к средней части берриаса. В отложениях нижней части нижнего валанжина нижнехетской свиты в скважине Восточно-Лодочная 1 по аммонитам прослеживается *a*-зона *Neotollia klimovskensis*, по фораминиферам – зона *Valanginella tatarica* KF2 (нижняя часть зоны).

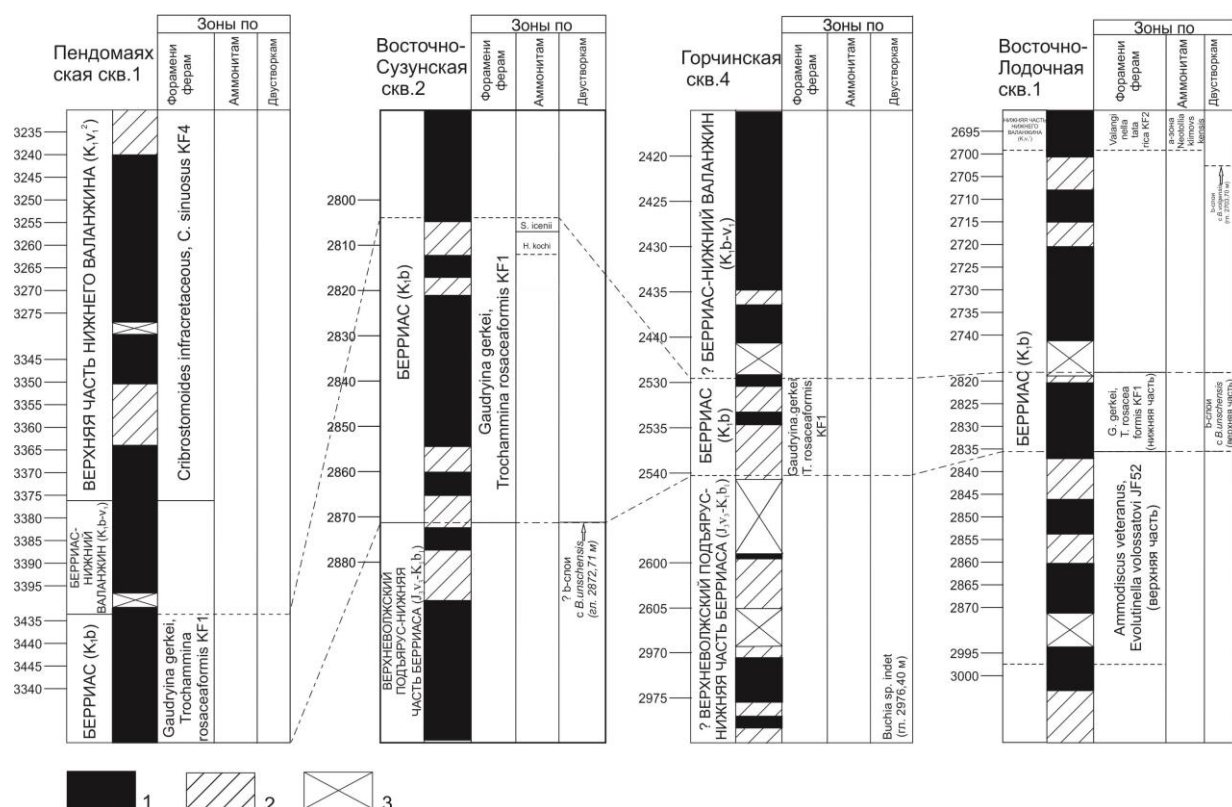


Рис. 3. Схема корреляции магнитостратиграфических разрезов скважин Пендомаяхской, Восточно-Сузунской, Горчинской и Восточно-Лодочной площадей: 1) прямая полярность; 2) обратная полярность; 3) нет данных [21]

Fig. 3. Correlation scheme for magnetostratigraphic sections of the Pendomayakhskaya, Vostochno Suzunskaya, Gorchinskaya, and Vostochno Lodochnaya areas wells: 1) normal polarity; 2) inverse polarity; 3) no data

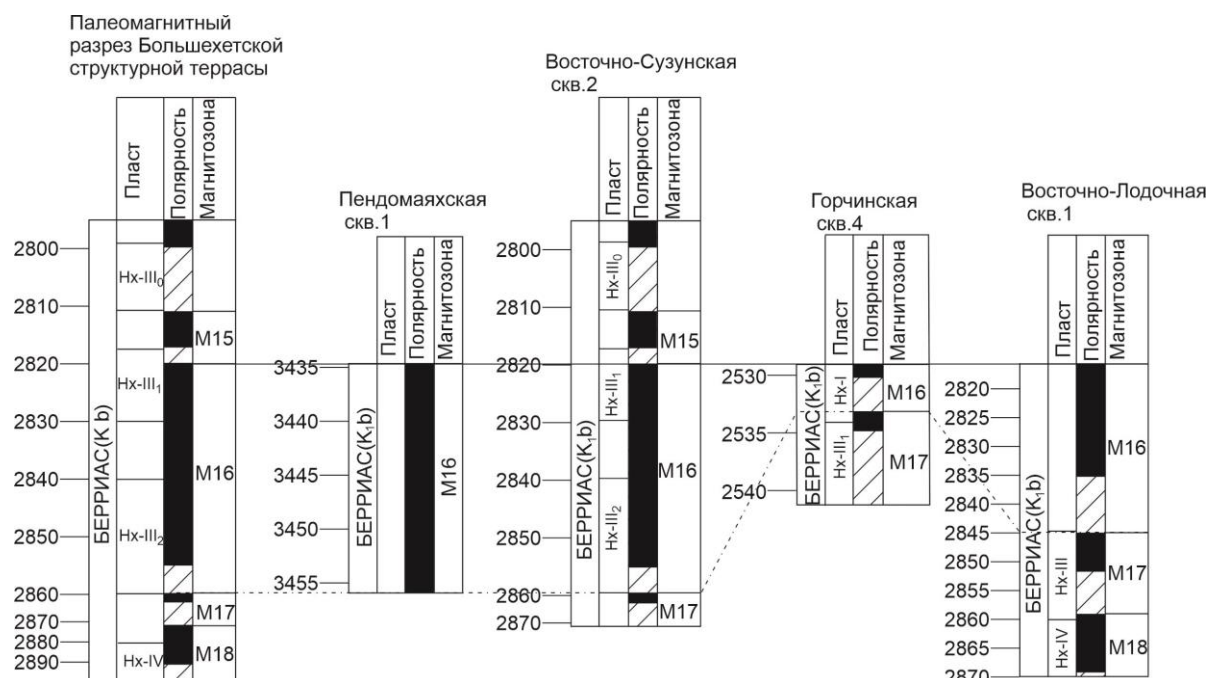


Рис. 4. Схема сопоставления палеомагнитных разрезов скважин Пендомаяхской, Восточно-Сузунской, Горчинской и Восточно-Лодочной площадей и сводный магнитостратиграфический разрез Большехетской структурной террасы: условные обозначения – на рис. 2 [21]

Fig. 4. Scheme of collation of paleomagnetic sections of the Pendomayakhskaya, Vostochno Suzunskaya, Gorchinskaya, and Vostochno Lodochnaya areas wells and a composite magnetostratigraphic section of the Bolshekhetskaya structural terrace: symbols are in the Fig. 2

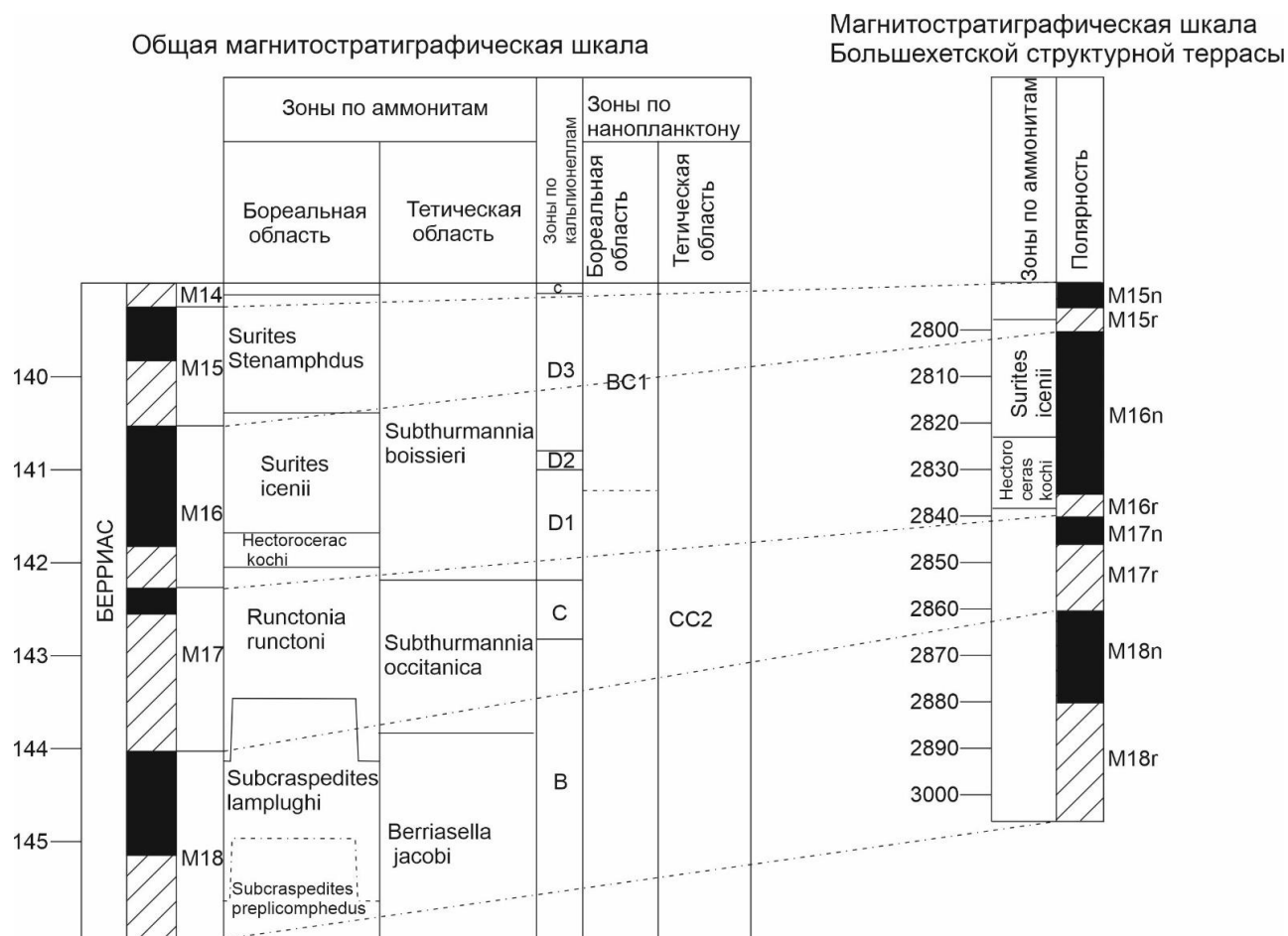


Рис. 5. Схема корреляции магнитостратиграфической шкалы Большехетской структурной террасы с Мировой магнитостратиграфической шкалой: условные обозначения – на рис. 2 [21]

Fig. 5. Correlation scheme of the magnetostratigraphic scale of the Bolshekhetskaya structural terrace with the World magnetostratigraphic scale: symbols are in the Fig. 2

Отложения верхней части нижнего валанжина суходудинской свиты (K_1) вскрыты в скважине Пендомаяхская 1 и охарактеризованы фораминиферовой зоной *Grirostomoides infracretaceous*, *C. sinuosus* KF4.

На основании сопоставления биостратиграфических и палеомагнитных материалов, а также с учетом данных геофизических исследований скважин [34] и опубликованной информации [35] был составлен сводный магнитостратиграфический разрез пограничных юрско-меловых отложений Большехетской структурной террасы (рис. 3, 4) и сопоставлен с общей мировой магнитостратиграфической шкалой (рис. 5) [36].

Различный вклад магнитостратиграфической информации исследованных скважин в сводный разрез можно объяснить структурным положением этих скважин. Наиболее объемная информация содержится в скважинах Восточно-Лодочная 1 и, особенно, в Восточно-Сузунской 2, локализованных соответственно в Лодочном и Сузунском валобразных поднятиях, осложняющих структуру

Большехетской террасы. Отсутствие в разрезе Восточно-Сузунской скважины 2 отложений $Nx-IV$ восполняется их наличием в разрезе скважины Восточно-Лодочная 1. Сокращение объема и «разорванность» информации в Восточно-Лодочной 1 скважине обусловлено влиянием Ванкорской структуры, в скважинах Пендомаяхская 1 и Горчинская 4 – смещением разрезов в западном направлении и возможным влиянием Мессояхской гряды (в случае Горчинской 1).

Таким образом, сводный магнитостратиграфический разрез берриас-верхневожского возраста отличается большим объемом отложений (105 м). В нем уверенно выделяются четыре магнитозоны, каждая состоит из двух подзон прямой и обратной полярности. Стратиграфический объем каждой подзоны в опорном разрезе сопоставлен с зональной аммонитовой шкалой берриаса. Зона *Hectoroceras kochi*, *Surites icenii* примерно отвечает хронам M15r, M16r, M16n. Граница волжского и берриасского ярусов располагается около рубежа хронов M17 и M18.

Заключение

На территории Большехетской структурной террасы в пределах Пендомаяхской, Восточно-Сузунской, Восточно-Лодочной и Горчинской площадей сформировалась мощная (более 100 м) терригенная толща мелководного генезиса – неравномерное тонкое переслаивание алевролита песчаного до глинистого с прослоями тонкозернистого алевитистого песчаника и аргиллита.

Отложениям берриасского возраста по палеонтологическим данным соответствует фораминиферовая зона *Gaudryina gerkei*, *Trochammina rosaceaformis* KF1, по аммонитам зоны – *Hectoroceras kochi*, *Surites icenii*.

Отсутствие клиноформ на данной территории, а также результаты аэрогеофизических исследований, подтверждающие высокий потенциал нефтегазоносности, во многом обосновали использование магнитостратиграфических исследований. Палеомагнитные исследования в некоторых местах разрезов выявили частые инверсии магнитного поля. При сопоставлении с биостратиграфией обнаружены частые смены полярности. Например, фораминиферовой зоне *Gaudryina gerkei*, *Trochammina rosaceaformis* KF1 в берриасе Восточно-Сузунской скважины 2 соответствует 7 инверсий. На фораминиферовую зону *Ammodiscus veteranus*, *Evolutinella volossatovi* JF52 (верхняя часть) Восточно-Лодочной скважины

2 приходится 4 смены полярности. Кроме того, сменной полярности богата та часть разреза, в которой не выявлено палеонтологических остатков (фораминиферы, аммониты, двустворки). Например, берриас – нижний валанжин в Горчинской скважине – характеризуется как минимум двумя сменами полярности. Из всего вышесказанного можно сделать вывод о высокой стратиграфической расчленяемой способности разреза с помощью палеомагнитного метода. Сопоставление с биостратиграфией позволило определить магнитохроны и сопоставить магнитостратиграфический разрез с общей мировой шкалой. Для изучения северо-восточных окраин Западно-Сибирской НПП и сопредельных территорий необходимы удаленные корреляции. В бореальных условиях это требует комплексирования биостратиграфических зон именно с палеомагнитными зонами, как явлениями планетарного масштаба, не зависящими от условий образования осадочных пород. Это подтверждается корреляцией Сводной магнитостратиграфической шкалы Большехетской структурной террасы и Общей мировой магнитостратиграфической шкалой, приведенной в заключительной части настоящей статьи.

Таким образом, по мере движения на север роль магнитостратиграфии в связи с открытием новых месторождений УВ будет только увеличиваться.

СПИСОК ЛИТЕРАТУРЫ

1. Конторович А.Э., Сурков В.С. Геология и полезные ископаемые России. Т. 2. – СПб.: Изд-во ВСЕГЕИ, 2000. – 477 с.
2. Баженовская свита – геофизическая аномалия / Г.Г. Номоконова, А.Ю. Колмаков, А.О. Алеева, И.В. Парубенко // Нетрадиционные ресурсы углеводородов: распространение, генезис, прогнозы, перспективы освоения: Материалы Всероссийской конференции с международным участием. – М., 12–14 ноября 2013. – М.: ГЕОС, 2013. – С. 611–612.
3. Новые данные по обстановкам седиментации верхнеюрско-нижнемеловой баженовской свиты Западной Сибири / В.Г. Эдер, С.В. Рыжкова, О.С. Дзюба, А.Г. Замирайлова // Меловая система России и ближнего зарубежья: проблемы стратиграфии и палеогеографии: Материалы XI Всероссийского совещания. – Томск: Изд-во ТГУ, 2022. – С. 309–312.
4. Скоробогатов В.А. Новая парадигма развития энергетического комплекса России в первой половине XXI века // Деловой журнал *Neftegaz.ru*. – 2019. – № 5. – С. 80–89.
5. Конторович В.А. Тектоника и нефтегазоносность западной части Енисей-Хатангского регионального прогиба // Геология и геофизика. – 2011. – Т. 52. – № 8. – С. 1027–1050.
6. Стратиграфические исследования верхнеюрских-нижнемеловых отложений Большехетской структурной террасы (Западная Сибирь) / Г.М. Татьяна, А.В. Файнгерц, С.Е. Агалаков, А.Н. Алейников, С.Н. Бабенко, И.В. Кислухин, О.Н. Костеша, К.П. Лялюк, А.С. Семенова, Н.Н. Стариков // Меловая система России и ближнего зарубежья: проблемы стратиграфии и палеогеографии: Материалы 8-ого Всероссийского совещания. – Симферополь: ЧерноморПРЕСС. 2016. – С. 273–275.
7. Кринин В.А. Строение, районирование и перспективы нефтегазоносности верхнеюрских отложений северо-востока Западно-Сибирского нефтегазоносного бассейна // Перспективы развития нефтегазодобывающего комплекса Красноярского края: Сборник материалов научно-практической конференции. – Красноярск: КНИИГиМС, 2007. – С. 202–204
8. Номоконова Г.Г., Расковалов Д.Ю., Колмаков А.Ю. О контроле месторождений углеводородов Западной Сибири глубинными геомагнитными структурами // Пятые научные чтения Ю.П. Булашевича. Глубинное строение. Геодинамика. Тепловое поле Земли. Интерпретация геофизических полей: Международная конференция. – Екатеринбург: ИГФ УрО РАН, 2009. – С. 341–375.
9. Новые данные по структуре Ванкорского газонефтяного месторождения / В.Г. Жидков, А.А. Поцелуев, Ю.С. Ананьев, В.А. Кринин // Известия Томского политехнического университета. Инжиниринг георесурсов. – 2016. – Т. 327. – № 4. – С. 44–54.
10. Молостовский Э.А., Храмов А.Н. Магнитостратиграфия и ее значение в геологии. – Саратов: Изд-во Саратов. ун-та, 1997. – 180 с.
11. Стратиграфический кодекс России. Издание третье, исправленное и дополненное. – СПб.: Изд-во ВСЕГЕИ, 2019. – 96 с.
12. Magnetostratigraphy, nannofossil stratigraphy and apparent polar wander for Adria-Africa in the Jurassic–Cretaceous boundary interval / J.E.T. Channell, C.E. Casellato, G. Muttoni, E. Erba // *Palaeogeography, Palaeoclimatology, Palaeoecology*. – 2010. – Vol. 293. – P. 51–75.

13. Initial geomagnetic field model from MAGSAT vector data / R.A. Langel, R.H. Estes, G.D. Mead, E.B. Fabiano, E.R. Lancaster // *Geophys. Res. Letts.* – 1980. – Vol. 7. – P. 793–796.
14. Nagata T. *Rock Magnetism.* – Tokio: Maruzen, 1961. – 350 p.
15. Irving E., Wiley J. *Paleomagnetism and its application to geological and geophysical problems.* – N.Y.: John Wiley & Sons, 1964. – 399 p.
16. Cox A. *Plate tectonics and geomagnetic reversals.* – San Francisco: W.H. Freeman, 1973. – 702 p.
17. McElhinny M.W. *Palaeomagnetism and Plate Tectonics.* – Cambridge: Cambridge Uni. Press, 1973. – 144 p.
18. Strangwau D.W. *History of the Earth's magnetic field.* – N. Y.: McGraw-Hill, 1970. – 620 p.
19. McDonald K.L., Gunst R.H. Recent trends in the Earth's magnetic field // *Journal of Geophysical Research.* – 1968. – Vol. 73. – P. 2057–2067.
20. Cox A., Dalrymple G.B. Statistical analysis of geomagnetic reversal data and the precision of potassium-argon dating // *Journal Geophysical Research.* – 1967. – Vol. 72. – P. 2603–2614.
21. Использование ориентированного керна при решении задач нефтяной геологии / В.П. Меркулов, Л.А. Краснощекова, Д.А. Черданцева, М.О. Коровин // *Современные проблемы седиментологии в нефтегазовом инжиниринге: Труды III Всероссийского научно-практического седиментологического совещания.* – Томск: Изд-во ТПУ, 2017. – С. 248–262.
22. Био-, хемо- и магнитостратиграфия пограничного интервала сантона-кампана разрезов Кудрино и Аксу-Дере (Юго-Западный Крым): проблемы глобальной корреляции и выбора лимитотипа нижней границы кампанского яруса. Статья 2. Магнито и хемотратиграфия, обсуждение данных / А.Ю. Гужигов, Е.Ю. Барабошкин, Г.Н. Александрова, И.П. Рябов, М.А. Устинова, Л.Ф. Копачевич, Г.В. Миранцев, А.Б. Кузнецов, П.А. Фокин, В.Л. Косоруков // *Стратиграфия. Геологическая корреляция.* – 2021. – № 5. – С. 27–58.
23. Колмаков А.Ю. Исследование палеомагнитной стабильности отложений нижнемелового нефтегазоносного комплекса Большехетской террасы // *Проблемы геологии и освоения недр: труды XXII Международного симпозиума имени академика М. А. Усова студентов и молодых ученых.* – Томск: Изд-во ТПУ, 2018. – Т. 1. – С. 404–406.
24. Верхнемеловые отложения Вольской структурной зоны Восточно-Европейской платформы: турон-нижний кампан разреза Коммунар. Статья 1. Описание разреза, бентосные фораминиферы, магнитостратиграфия / Е.М. Первушов, И.П. Рябов, В.Б. Сельцер, И. Валащик, Е.А. Калякин, А.А. Гужигова, Е.И. Ильинский, Д.В. Худяков // *Стратиграфия. Геологическая корреляция.* – 2022. – № 2. – С. 101–124.
25. Результаты дополнительного био- и магнитостратиграфического изучения турона р. Басс (Чеченская республика) / В.А. Фомин, И.П. Рябов, А.Ю. Гужигов, А.А. Гужигова // *Меловая система России и ближнего зарубежья: проблемы стратиграфии и палеогеографии: Материалы XI Всероссийского совещания.* – Саратов, 2022. – С. 281–284.
26. Магнитостратиграфия пограничного интервала мела-палеогенаюга Саратовского правобережья / Д.А. Шелепов, А.Ю. Гужигов, И.П. Рябов, Е.М. Первушов // *Меловая система России и ближнего зарубежья: проблемы стратиграфии и палеогеографии: Материалы XI Всероссийского совещания.* – Томск, 2022. – С. 285–288.
27. Новые био- и магнитостратиграфические данные по титону-берриасу Байдарской котловины (юго-западный Крым). / О.В. Шурекова, Ю.Н. Савельева, В.В. Аркадьев, А.Ю. Гужигов, А.Г. Маникин // *Меловая система России и ближнего зарубежья: проблемы стратиграфии и палеогеографии: Материалы XI Всероссийского совещания.* – Томск, 2022. – С. 293–296.
28. Calcareous nannofossils and other proxies define the Santonian-Campanian boundary in the Central Crimean Mountains (Alan-Kyr section) / M.N. Ovechkina, L.F. Kopaeich, G.N. Aleksandrova, P.A. Proshina, I.A. Ryabov, E.Yu. Baraboshkin., A.Yu. Guzhikov, M.B. Mostovski // *Cretaceous Res.* – 2021. – Vol. 119. – P. 203–205.
29. Vishnevskaya V.S., Kopaeich L.F. Microfossil assemblages as key to reconstruct sea-level fluctuations, cooling episodes and palaeogeography: the Albian to Maastrichtian of Boreal and Peri-Tethyan Russia // *Geol. Soc. London. Spec. Publ.* – 2020. – Vol. 498. – P. 165–187.
30. New bio-, chemo- and magnetostratigraphy of the Santonian–Campanian boundary in the Kudrino and Aksu-Dere Sections (SW Crimea): problems of global correlation and selection of the lower boundary stratotype of the Campanian. 2. Magneto- and chemostratigraphy discussion / A.Yu. Guzhikov, E.Yu. Baraboshkin, G.N. Aleksandrova, I.P. Ryabov, M.A. Ustinova, L.F. Kopaeich, G.V. Mirantsev, A.B. Kuznetsov, P.A. Fokin, V.L. Kosorukov // *Stratigraphy and Geological Correlation.* – 2021. – Vol. 29. – P. 518–547.
31. Palynology of the Cenomanian to lowermost Campanian (Upper Cretaceous) chalk of the Trunch Borehole (Norfolk, UK) and a new dinoflagellate cyst bioevent stratigraphy for NW Europe / M.A. Pearce, I. Jarvis, P.J. Ball, J. Laurin // *Rev. Palaeobot. Palynol.* – 2020. – Vol. 278. – P. 104–108.
32. New sedimentological, magnetostratigraphic, and palynological data on the Campanian / E.Yu. Baraboshkin, A.Yu. Guzhikov, G.N. Aleksandrova, V.A. Fomin, B.G. Pokrovsky, V.A. Grishchenko, A.G. Manikin, E.V. Naumov // *Maastrichtian section of Beshkosh Mountain, South Western Crimea, Stratigr. Geol. Correl.* – 2020. – Vol. 28. – P. 816–858.
33. Баженовский горизонт Западной Сибири (стратиграфия, палеогеография, экосистема, нефтеносность) / Ю.В. Брадучан, А.В. Гольберт, Ф.Г. Гурари, В.А. Захаров, С.П. Булыньникова, И.Г. Климова, М.С. Месежников, Н.П. Вячкилева, Г.Э. Козлова, А.И. Лебедев, Т.И. Нальняева, А.С. Турбина. – Новосибирск: Наука, 1986. – 216 с.
34. Характеристика пограничных юрско-меловых отложений Большехетской структурной террасы (Западная Сибирь) / В.А. Маринов, И.В. Кислухин, В.П. Меркулов, И.П. Бекирова, А.Е. Игольников, С.Е. Агалаков // *Меловая система России и ближнего зарубежья: проблемы стратиграфии и палеогеографии: Материалы IX Всероссийского совещания.* – Белгород: ПОЛИТЕРРА, 2018. – С. 178–182.
35. Известковистый нанопланктон и магнитостратиграфия титона-берриаса Восточного Крыма (Феодосийский район) / В.В. Аркадьев, М. Лескано, А. Кончейро, А.Ю. Гужигов, Е.Ю. Барабошкин // *Меловая система России и ближнего зарубежья: проблемы стратиграфии и палеогеографии: Материалы 10-ого Всероссийского совещания.* – Магадан: ОАО «МАОБТИ», 2020. – С. 18–21.
36. *Geologic Time Scale 2020* / F.M. Gradstein, J.G. Ogg, M.D. Schmitz, G.M. Ogg. 1st ed. – Amsterdam: Elsevier, 2020. – 1390 p.

Информация об авторах

Антон Юрьевич Колмаков, ассистент кафедры динамической геологии геолого-географического факультета Национального исследовательского Томского государственного университета, Россия, 634050, г. Томск, пр. Ленина, 36. antokolmakov@mail.ru

Виталий Павлович Меркулов, кандидат геолого-минералогических наук Национального исследовательского Томского политехнического университета, Россия, 634050, г. Томск, пр. Ленина, 30.

Анастасия Сергеевна Семенова, инженер-исследователь геолого-географического факультета Национального исследовательского Томского государственного университета, Россия, 634050, г. Томск, пр. Ленина, 36. as.semenova87@mail.ru

Елизавета Николаевна Осипова, доцент отделения геологии Инженерной школы природных ресурсов Национального исследовательского Томского политехнического университета, Россия, 634050, г. Томск, пр. Ленина, 30. osipovaen@tpu.ru

Поступила в редакцию: 27.04.2024

Поступила после рецензирования: 06.05.2024

Принята к публикации: 09.09.2024

REFERENCES

1. Kontorovich A.E., Surkov V.S. *Western Siberia. Geology and minerals of Russia*. St. Petersburg, VSEGEI Publ., 2000. 477 p. (In Russ.)
2. Nomokonova G.G., Kolmakov A.Yu., Aleeva A.O., Parubenko I.V. Bazhenov Formation – a geophysical anomaly. *Unconventional hydrocarbon resources: distribution, genesis, forecasts, development prospects. Materials of the All-Russian Conference with international participation*. Moscow, GEOS Publ., 2013. pp. 183–188. (In Russ.)
3. Eder V.G., Ryzhkova S.V., Dzyuba O.S., Zamirailova A.G. New data by sedimentation conditions of the Upper Jurassic-Lower Cretaceous Bazhenov formation of Western Siberia *Cretaceous system of Russia and neighboring countries: problems of stratigraphy and paleogeography. Materials of the 11th All-Russian meeting*. Tomsk, TSU Publ. House, 2022. pp. 309–312. (In Russ.)
4. Skorobogatov V.A. A new paradigm for the development of the Russian energy complex in the first half of the 21st century. *Business magazine Neftegaz.ru.*, 2019, no. 5, pp. 80–89. (In Russ.)
5. Kontorovich V.A. Tectonics and oil and gas potential of the western part of the Yenisei-Khatanga regional trough. *Geology and Geophysics*, 2011, vol. 52, no. 8, pp. 1027–1050. (In Russ.)
6. Tatyannin G.M., Faingerts A.V., Agalakov S.E., Aleinikov A.N. Stratigraphic studies of the Upper Jurassic-Lower Cretaceous deposits of the Bolshekhetskaya structural terrace (Western Siberia). *Cretaceous system of Russia and neighboring countries: problems of stratigraphy and paleogeography. Materials of the 8th All-Russian meeting*. Simferopol, Chernomor PRESS, 2016. pp. 273–275. (In Russ.)
7. Krinin V.A. Structure, zoning and prospects of oil and gas potential of the Upper Jurassic deposits of the north-east of the West Siberian oil and gas basin. *Collection of materials of the scientific and practical conference. Prospects for the development of the oil and gas production complex of the Krasnoyarsk Territory*. Krasnoyarsk, KNIIGiMS Publ., 2007. pp. 202–204.
8. Nomokonova G.G., Raskovalov D.Yu., Kolmakov A.Yu. On the control of hydrocarbon deposits in Western Siberia by deep geomagnetic structures. *Deep structure. Geodynamics. Thermal field of the Earth. Interpretation of geophysical fields. Fifth scientific readings by Yu.P. Bulashevich. International conference*. Yekaterinburg, IGP UB RAS Publ., 2009. pp. 341–375. (In Russ.)
9. Zhitkov V.G., Potseluev A.A., Ananiev Yu.S., Kirin V.A. New data on the structure of the Vankor gas and oil deposit. *Bulletin of the Tomsk Polytechnic University. Geo Assets Engineering*, 2016, vol. 327, no. 4, pp. 44–54. (In Russ.)
10. Molostovsky E.A., Khranov A.N. *Magnetostratigraphy and its significance in geology*. Saratov, Saratov university Publ. House, 1997. 180 p. (In Russ.)
11. *Stratigraphic Code of Russia*. St. Petersburg, VSEGEI Publ. House, 2019. 96 p.
12. Channell J.E.T., Casellato C.E., Muttoni G., Erba E. Magnetostratigraphy, nannofossil stratigraphy and apparent polar wander for Adria-Africa in the Jurassic–Cretaceous boundary interval. *Palaeogeography, Palaeoclimatology, Palaeoecology*, 2010, vol. 293, pp. 51–75.
13. Langel R. A., Estes R.H., Mead G.D., Fabiano E.B., Lancaster E.R. Initial geomagnetic field model from MAGSAT vector data. *Geophys. Res. Letts.*, 1980, vol. 7, pp. 793–796.
14. Nagata T. *Rock Magnetism*. 2nd ed. Tokyo, Maruzen, 1961. 350 p.
15. Irving E. *Paleomagnetism and its application to geological and geophysical problems*. N.Y., J. Wiley, 1964. 399 p.
16. Cox A. *Plate tectonics and geomagnetic reversals*. San Francisco, W.H. Freeman, 1973. 716 p.
17. McElhinny M.W. *Palaeomagnetism and plate tectonics*. Cambridge, Cambridge University Press, 1973. 144 p.
18. Strangway D.W. *History of the Earth's magnetic field*. N. Y., McGraw-Hill, 1970. pp. 612–613.
19. McDonald K.L., Gunst R.H. Recent trends in the Earth's magnetic field. *J. of Geophys. Res.*, 1968, vol. 73, pp. 2057–2067.
20. Cox A., Dalrymple G.B. Statistical analysis of geomagnetic reversal data and the precision of potassium-argon dating. *J. Geophys. Res.*, 1967, vol. 72, pp. 2603–2614.
21. Merkulov V.P., Krasnoshchekova L.A., Cherdantseva D.A., Korovin M.O. The use of oriented core in solving problems of petroleum geology. *Modern problems of sedimentology in oil and gas engineering. Proc. of the III All-Russian scientific and practical sedimentological meeting*. Tomsk, TPU Publ. House, 2017. pp. 248–262. (In Russ.)

22. Guzhikov A.Yu., Baraboshkin E.Yu., Alexandrova G.N., Ryabov I.P., Ustinova M.A., Kopaevich L.F., Mirantsev G.V., Kuznetsov A.B., Fokin P.A., Kosorukov V.L. Bio-, chemo- and magnetostratigraphy of boundary interval the Santon-Campan of sections the Kudrino and Aksu-Dere (Southwestern Crimea): problems of global correlation and selection of the limitotype of the lower boundary of the Campanian stage. Article 2. Magneto and chemostratigraphy, data discussion. *Stratigraphy. Geological correlation*, 2021, no. 5, pp. 27–58. (In Russ.)
23. Kolmakov A.Yu. Investigation of the paleomagnetic stability of deposits of the coal oil and gas complex of the Bolshekhetskaya terrace. *Problems of geology and subsoil development. Proc. of the XXII Symposium named after academician M.A. Usov for students and young scientists*. Tomsk, TPU Publ. House, 2018. Vol. 1, pp. 404–406. (In Russ.)
24. Pervushov E.M., Ryabov I.P., Seltser V.B., Valashchik I., Kalyakin E.A., Guzhikova A.A., Ilyinsky E.I., Khudyakov D.V. Upper Cretaceous deposits of the Volsk structural zone of the East European Platform: Turonian – Lower Campanian of section the Kommunar. Article 1. Description of the section, benthonic foraminifers, magnetostratigraphy. *Stratigraphy. Geological correlation*, 2021, no. 2, pp. 101–124. (In Russ.)
25. Fomin V.A., Ryabov I.P., Guzhikov A.Yu., Guzhikova A.A. Results of additional bio- and magnetostratigraphic study of Turonian the Bass River (Chechen Republic). *Cretaceous system of Russia and neighboring countries: problems of stratigraphy and paleogeography. Materials of the 11th All-Russian meeting*. Saratov, 2022. pp. 281–284. (In Russ.)
26. Shelepov D.A., Guzhikov A.Yu., Ryabov I.P., Pervushov Ye.M. Magnetostratigraphy of boundary interval of the Cretaceous-Paleogene of south the Saratov Right Bank. *Cretaceous system of Russia and neighboring countries: problems of stratigraphy and paleogeography. Materials of the 11th All-Russian meeting*. Tomsk, 2022. pp. 285–288. (In Russ.)
27. Shurekova O.V., Savelyeva Yu.N., Arkadyev V.V., Guzhikov A.Yu., Manikin A.G. New data on the bio- and magnetostratigraphy of the Tithonian-Berriasian of the Baydar bed (Southwestern Crimea). *Cretaceous system of Russia and neighboring countries: problems of stratigraphy and paleogeography. Materials of the 11th All-Russian meeting*. Tomsk, 2022. pp. 293–296. (In Russ.)
28. Ovechkina M.N., Kopaevich L.F., Aleksandrova G.N., Proshina P.A., Ryabov I.A., Baraboshkin E.Yu., Guzhikov A.Yu., Mostovski M.B. Calcareous nannofossils and other proxies define the Santonian–Campanian boundary in the Central Crimean Mountains (Alan-Kyr section). *Cretaceous Res*, 2021, vol. 119, pp. 203–205.
29. Vishnevskaya V.S., Kopaevich L.F. Microfossil assemblages as key to reconstruct sea-level fluctuations, cooling episodes and paleogeography: the Albian to Maastrichtian of Boreal and Peri-Tethyan Russia. *Geol. Soc. London. Spec. Publ.*, 2020, vol. 498, pp. 165–187.
30. Guzhikov A.Yu., Baraboshkin E.Yu., Aleksandrova G.N., Ryabov I.P., Ustinova M.A., Kopaevich L.F., Mirantsev G.V., Kuznetsov A.B., Fokin P.A., Kosorukov V.L. New Bio-, Chemo- and Magnetostratigraphy of the Santonian–Campanian Boundary in the Kudrino and Aksu-Dere Sections (SW Crimea): Problems of Global Correlation and Selection of the Lower Boundary Stratotype of the Campanian. 2. Magneto- and Chemostratigraphy Discussion. *Stratigraphy and Geological Correlation*, 2021, vol. 29, pp. 518–547.
31. Pearce M.A., Jarvis I., Ball P.J., Laurin J. Palaeobot. Palynol. Palynology of the Cenomanian to lowermost Campanian (Upper Cretaceous) chalk of the Trunch Borehole (Norfolk, UK) and a new dinoflagellate cyst bioevent stratigraphy for NW Europe. *Rev. Palaeobot. Palynol*, 2020, vol. 278, pp. 104–108.
32. Baraboshkin E.Yu., Guzhikov A.Yu., Aleksandrova G.N., Fomin V.A., Pokrovsky B.G., Grishchenko V.A., Manikin A.G., Naumov E.V. New sedimentological, magnetostratigraphic, and palynological data on the Campanian. Maastrichtian section of Beshkosh Mountain, South Western Crimea. *Stratigr. Geol. Correl.*, 2020, vol. 28, pp. 816–858.
33. Braduchan Yu.V., Gurari F.G., Zakharov V.A. *Bazhenov horizon of Western Siberia (stratigraphy, paleogeography, ecosystem, oil content)*. Novosibirsk, Nauka Publ., 1986. 216 p. (In Russ.)
34. Marinov V.A., Kislukhin I.V., Merkulov V.P., Bekirova I.P., Igolnikov A.E., Agalakov S.E. Characteristics of the boundary Jurassic-Cretaceous deposits of the Bolshekhetskaya structural terrace (Western Siberia). *The Cretaceous system of Russia and neighboring countries: problems of stratigraphy and paleogeography. Proc. of the IX All-Russian meeting*. Belgorod, POLITERRA, 2018. pp. 178–182. (In Russ.)
35. Arkadiev V.V., Leskano M., Concheiro A., Guzhikov A.Yu., Baraboshkin E.Yu. Calcareous nannoplankton and magnetostratigraphy of the Tithonian-Berriasian of Eastern Crimea (Feodosiya region). *Cretaceous system of Russia and neighboring countries: problems of stratigraphy and paleogeography. Materials of the 10th All-Russian meeting*. Magadan, JSC "MAOBTI" Publ., 2020. pp. 18–21. (In Russ.)
36. Gradstein F.M., Ogg J.G., Schmitz M.D., Ogg G.M. *Geologic Time Scale 2020*. 1st ed. Amsterdam, Elsevier, 2020. 1390 p.

Information about the authors

Anton Yu. Kolmakov, Assistant, National Research Tomsk State University, 36, Lenin avenue, Tomsk, 634050, Russian Federation. antokolmakov@mail.ru

Vitaly P. Merkulov, Cand. Sc., National Research Tomsk Polytechnic University, 30, Lenin avenue, Tomsk, 634050, Russian Federation.

Anastasiya S. Semenova, Research Engineer, National Research Tomsk State University, 36, Lenin avenue, Tomsk, 634050, Russian Federation. as.semenova87@mail.ru

Elizaveta N. Osipova, Assistant Professor, National Research Tomsk Polytechnic University, 30, Lenin avenue, Tomsk, 634050, Russian Federation. osipovaen@list.ru

Received: 27.04.2024

Revised: 06.05.2024

Accepted: 09.09.2024

УДК 681.51:51.751-74

DOI: 10.18799/24131830/2024/9/4826

Шифр специальности ВАК: 2.4.2

Разработка наблюдателя с оперативным мониторингом угловой скорости ротора и момента сопротивления на валу погружного асинхронного двигателя

А.С. Глазырин^{1,2}, С.С. Попов^{1,3}, Е.И. Попов⁴, В.А. Копырин⁴,
Р.Н. Хамитов^{4,5}, А.А. Филипас¹, В.В. Тимошкин¹, Е.А. Беляускене¹,
Ю.О. Кулеш^{1✉}, Е.В. Боловин^{1,6}, В.З. Ковалев^{2,1}, М.В. Денеко⁷

¹ Национальный исследовательский Томский политехнический университет, Россия, г. Томск

² Югорский государственный университет, Россия, г. Ханты-Мансийск

³ ООО «НПФ Мехатроника-Про», Россия, г. Томск

⁴ Тюменский индустриальный университет, Россия, г. Тюмень

⁵ Омский государственный технический университет, Россия, г. Омск

⁶ ООО ИНТ АО «ЭлеСи», Россия, г. Томск

⁷ Московский технический университет связи и информатики, Россия, г. Москва

✉ yok13@tpu.ru

Аннотация. Актуальность. При эксплуатации погружного оборудования для добычи нефти в агрессивных средах и переводе скважин в режим циклической эксплуатации наблюдается уменьшение срока службы погружной установки для добычи нефти. В первом случае это связано с образованием солей и засорением рабочих органов электронасоса механическими примесями. Во втором случае – с увеличением количества пусков погружного электродвигателя. Решение сложившихся трудностей возможно путем внедрения замкнутых систем управления погружными электродвигателями на основе наблюдателей переменных состояния, что обуславливает актуальность исследования. **Цель:** разработка наблюдателя с оперативным мониторингом угловой скорости ротора и момента сопротивления на валу погружного асинхронного двигателя при несогласованности начальных условий в различных режимах работы и его апробирование с помощью средств моделирования. **Методы.** Наблюдатель построен на основании известных моделей электродвигателей в неподвижной системе координат α, β , теории БИХ-фильтров для получения прогноза оценок угловой скорости ротора и момента на валу и их корректировки в режиме реального времени. **Результаты.** Предложена оригинальная структура наблюдателя с оперативным мониторингом угловой скорости ротора и момента сопротивления на валу погружного асинхронного двигателя. **Выводы.** Продемонстрирована работоспособность наблюдателя при несогласованности начальных условий и данных модели электродвигателя в различных режимах работы. Во всех режимах получены устойчивые оценки скорости и момента сопротивления на валу электродвигателя. При этом погрешность оценивания угловой скорости при условии изменения нагрузки на валу и пуске в нагруженном состоянии составляет не более 1,2 %, что допустимо в системах управления погружными электродвигателями. Выявлено, что разработанный наблюдатель при условии изменения активных сопротивлений статора и ротора в диапазонах от –25 до +25 % от номинального значения получает оценки угловой скорости с интегральной погрешностью не более 5 %, кроме пуска двигателя при уменьшении значения активного сопротивления ротора на 25 % от номинального значения – 5,53 %, что допустимо в инженерной практике.

Ключевые слова: погружной электродвигатель, центробежный электронасос, наблюдатель угловой скорости, наблюдатель момента на валу двигателя, режим реального времени

Благодарности: Исследование выполнено в рамках государственного задания Министерства науки и высшего образования Российской Федерации (тема № FENG-2023-0001 «Предиктивное управление потоками энергии электрогенерирующих комплексов Арктики и Крайнего Севера, при стохастических характерах потребления и генерации электрической энергии: теория, синтез, эксперимент»).

Для цитирования: Разработка наблюдателя с оперативным мониторингом угловой скорости ротора и момента сопротивления на валу погружного асинхронного двигателя / А.С. Глазырин, С.С. Попов, Е.И. Попов, В.А. Копырин, Р.Н. Хамитов, А.А. Филипас, В.В. Тимошкин, Е.А. Беляускене, Ю.О. Кулеш, Е.В. Боловин, В.З. Ковалев, М.В. Денеко // Известия Томского политехнического университета. Инжиниринг георесурсов. – 2024. – Т. 335. – № 9. – С. 203–219. DOI: 10.18799/24131830/2024/9/4826

UDC 681.51:51.751-74

DOI: 10.18799/24131830/2024/9/4826

Desing of an observer with real time monitoring speed and load torque for submersible induction motors

A.S. Glazyrin^{1,2}, S.S. Popov^{1,3}, E.I. Popov⁴, V.A. Kopyrin⁴, R.N. Khamitov⁵,
A.A. Filipas¹, V.V. Timoshkin¹, E.A. Beliauskene¹, Yu.O. Kulesh^{1✉}, E.V. Bolovin^{1,6},
V.Z. Kovalev^{2,1}, M.V. Deneko⁷

¹ National Research Tomsk Polytechnic University, Tomsk, Russian Federation

² Yugra State University, Khanty-Mansiysk, Russian Federation

³ «NPF Mechatronica-Pro» LTD, Tomsk, Russian Federation

⁴ Industrial University of Tyumen, Tyumen, Russian Federation

⁵ Omsk State Technical University, Omsk, Russian Federation

⁶ LLC «INT» of JSC «EleSy», Tomsk, Russian Federation

⁷ Moscow Technical University of Communications and Informatics, Moscow, Russian Federation

✉ yok13@tpu.ru

Abstract. Relevance. When operating submersible equipment for oil production in aggressive environments and transferring wells to the cyclic operation mode, a decrease in the service life of the submersible installation for oil production is observed. In the first case, this is due to the formation of salt deposits and clogging of the working parts of the electric pump with mechanical impurities. In the second case – an increase in the number of starts of the submersible electric motor. To solve the existing problems, it is possible to implement closed control systems for submersible electric motors based on state variable observers, which determines the relevance of the study. **Aim.** To develop an observer with operational monitoring of the angular velocity of the rotor and the moment of resistance on the shaft of a submersible asynchronous motor at inconsistency of the initial conditions in various operating modes and its testing using modeling tools. **Methods.** The observer is built on the basis of known engine models in a fixed coordinate system α, β , the theory of IIR-filters to obtain a forecast of estimates of the angular velocity of the rotor and the torque on the shaft and their correction in real time. **Results.** The authors have proposed the original structure of an observer with operational monitoring of the angular velocity of the rotor and the moment of resistance on the shaft of a submersible asynchronous motor. **Conclusions.** The paper demonstrates the observer performance with inconsistency of initial conditions and electric motor model data in various operating modes. In all modes, stable estimates of the speed and torque of resistance on the electric motor shaft are obtained. At the same time, the error in estimating the angular velocity under the condition of changing the load on the shaft and starting in the loaded state is no more than 1.2%, which is acceptable in submersible electric motor control systems. It is revealed that the developed observer, under the condition of changing the active resistance of the stator and rotor in the ranges from –25 to +25% of the nominal value, obtains estimates of the angular velocity with an integral error of no more than 5%, except for starting the motor with a decrease in the active resistance of the rotor by 25% of the nominal value –5.53%, which is acceptable in engineering practice.

Keywords: submersible induction motor, electric centrifugal pump installation, speed observer, motor torque observer, real-time mode

Acknowledgements: The research was carried out within the framework of the state assignment of the Ministry of Science and Higher Education of the Russian Federation (theme no. FENG-2023-0001 "Predictive control of energy flows of power generating complexes of the Arctic and the Far North, with stochastic nature of consumption and generation of electrical energy: theory, synthesis, experiment").

For citation: Glazyrin A.S., Popov S.S., Popov E.I., Kopyrin V.A., Khamitov R.N., Filipas A.A., Timoshkin V.V., Beliauskene E.A., Kulesh Yu.O., Bolovin E.V., Kovalev V.Z., Deneko M.V. Desing of an observer with real time monitoring speed and load torque for submersible induction motors. *Bulletin of the Tomsk Polytechnic University. Geo Assets Engineering*, 2024, vol. 335, no. 9, pp. 203–219. DOI: 10.18799/24131830/2024/9/4826

Введение

На сегодняшний день нефть продолжает оставаться ключевым ресурсом российской и мировой экономик, и, согласно экспертам, нет оснований предполагать, что произойдет сокращение ее добычи в ближайшем будущем [1–4].

Основная масса добытой нефти получена с использованием механизированных методов, в частности центробежными электронасосами (ЭЦН), которые, как правило, приводятся в движение погружными асинхронными двигателями (ПЭД). В процессе работы ЭЦН могут возникать пробле-

мы, такие как заклинивание ротора, вызванное образованием солеотложений и засорением рабочих органов электронасоса механическими примесями [5, 6], что напрямую влияет на момент сопротивления на валу погружного электродвигателя и негативно сказывается на его ресурсе и сроке службы. Попытки устранить заклинивания могут привести к срезу шпонок, обеспечивающих передачу крутящего момента от вала ротора насосу, или к деформации вала [7].

В процессе эксплуатации скважин на поздних стадиях разработки нефтяного месторождения происходят увеличение обводненности, уменьшение подпора пласта или деструкция притока, влияющая на коэффициент продуктивности. Для данных скважин целесообразен переход в режим циклической эксплуатации. Тем не менее перевод скважины в режим циклической эксплуатации приводит к уменьшению срока службы погружной установки для добычи нефти [8–10].

Для повышения срока службы погружной установки для добычи нефти предлагается использовать наблюдатели переменных состояния погружного электродвигателя, которые позволяют производить оценку физически неизмеримых переменных состояния электродвигателя, к которым в данном случае можно отнести скорость вращения ротора и момент сопротивления на валу [11–16]. Авторы видят применение наблюдателей в контексте добычи нефти в следующем:

- информационное назначение;
- разработка замкнутой системы управления погружным электродвигателем.

В первом варианте информация о переменных состоянии (токи и напряжения статора, угловая скорость ротора, момент сопротивления на валу) передается на экран оператора, где происходит сравнение с заданными эксплуатацией параметрами скважины и при необходимости выполняются определенные регламентом мероприятия.

Во втором варианте разработка замкнутой системы управления обеспечивает реализацию алгоритмов управления ЭЦН, позволяющих не доводить до состояния заклинивания насоса и изменять режим непрерывной эксплуатации скважины на режим сопутствующей очистки. В режиме непрерывной эксплуатации в осложненных условиях необходимо следить за моментом нагрузки и не доводить до критического состояния, при котором импульсный режим позволяет провести очистку насоса с контролем вывода на номинальный режим.

Реализацию динамических режимов управления погружным электродвигателем в составе

установки ЭЦН при эксплуатации скважины в циклическом режиме авторы считают наиболее перспективной. Данные режимы характеризуются резко-переменными и изменяющимися во времени параметрами электрической и механической составляющих установки для добычи нефти. Соответственно актуальной задачей является разработка работоспособной структуры наблюдателя с оперативным мониторингом угловой скорости ротора и момента сопротивления на валу погружного асинхронного двигателя, который будет устойчив при изменении параметров двигателя в ходе работы или при получении неточных оценок от идентификаторов [17–19], а также при условии изменяющейся нагрузки и работе при нагрузках выше номинальной.

Принцип построения наблюдателя с оперативным мониторингом угловой скорости ротора и момента сопротивления на валу погружного асинхронного двигателя

Построение наблюдателя с оперативным мониторингом угловой скорости ротора и момента сопротивления на валу погружного асинхронного двигателя базируется на математической модели асинхронного двигателя в прямоугольной стационарной системе координат α, β [20, 21]. Логика построения наблюдателя состоит из следующих этапов:

1. Определение величины прогноза оценки токов статора $\hat{I}_{1\alpha}(k)$, $\hat{I}_{1\beta}(k)$ на текущем шаге дискретизации согласно выражениям (1), (2):

$$\hat{I}_{1\alpha}(k) = \frac{\Delta t}{2} \frac{1}{L_3} \times \left\{ \begin{aligned} & \left[U_{1\alpha}(k) + k_{1\alpha} \{ I_{1\alpha}(k) - \hat{I}_{1\alpha}(k) \} + \right. \\ & \left. + \frac{R_2' L_m}{L_2^2} \hat{\psi}_{2\alpha}(k) + \right. \\ & \left. + \frac{L_m}{L_2} z_p \hat{\psi}_{2\beta}(k) \hat{\omega}(k) - R_3 \hat{I}_{1\alpha}(k) \right] + \\ & \times \left[\begin{aligned} & U_{1\alpha}(k-1) + k_{1\alpha} \{ I_{1\alpha}(k-1) - \hat{I}_{1\alpha}(k-1) \} + \\ & + \frac{R_2' L_m}{L_2^2} \hat{\psi}_{2\alpha}(k-1) + \\ & + \frac{L_m}{L_2} z_p \hat{\psi}_{2\beta}(k-1) \hat{\omega}(k-1) - R_3 \hat{I}_{1\alpha}(k-1) \end{aligned} \right] \end{aligned} \right\}; \quad (1)$$

$$\hat{I}_{1\beta}(k) = \frac{\Delta t}{2} \frac{1}{L_3} \left\{ \left[\begin{aligned} &U_{1\beta}(k) + k_{1\beta} \{ I_{1\beta}(k) - \hat{I}_{1\beta}(k) \} + \\ &+ \frac{R_2' L_m}{L_2^2} \hat{\psi}_{2\beta}(k) - \\ &- \frac{L_m}{L_2} z_p \hat{\psi}_{2\alpha}(k) \hat{\omega}(k) - R_3 \hat{I}_{1\beta}(k) \end{aligned} \right] + \left[\begin{aligned} &U_{1\beta}(k-1) + k_{1\beta} \{ I_{1\beta}(k-1) - \hat{I}_{1\beta}(k-1) \} + \\ &+ \frac{R_2' L_m}{L_2^2} \hat{\psi}_{2\beta}(k-1) - \\ &- \frac{L_m}{L_2} z_p \hat{\psi}_{2\alpha}(k-1) \hat{\omega}(k-1) - \\ &R_3 \hat{I}_{1\beta}(k-1) \end{aligned} \right] \right\}, \quad (2)$$

где Δt – период дискретизации (принимается равным 100 мкс); k – номер текущего шага дискретизации; $k-1$ – номер предыдущего шага дискретизации; $U_{1\alpha}(k)$ и $U_{1\beta}(k)$ – входное напряжение на текущем шаге дискретизации, В; $\hat{I}_{1\alpha}(k)$, $\hat{I}_{1\beta}(k)$ – оценки токов на текущем шаге дискретизации, А; $\hat{I}_{1\alpha}(k-1)$, $\hat{I}_{1\beta}(k-1)$ – оценки токов на предыдущем шаге дискретизации, А; $\hat{\psi}_{2\alpha}(k)$, $\hat{\psi}_{2\beta}(k)$ – оценки потокосцепления ротора на текущем шаге дискретизации, Вб; $\hat{\psi}_{2\alpha}(k-1)$, $\hat{\psi}_{2\beta}(k-1)$ – оценки потокосцепления ротора на предыдущем шаге дискретизации, Вб; R_1 – активное сопротивление обмотки статора, Ом; R_2' – приведенное к статору активное сопротивление обмотки ротора, Ом; $R_3 = R_1 + R_2' \left(\frac{L_m}{L_2} \right)^2$ –

эквивалентное активное сопротивление асинхронного двигателя, Ом; L_1 – эквивалентная индуктивность обмотки статора, Гн; L_2 – эквивалентная индуктивность обмотки ротора, Гн; $L_3 = L_1 - \frac{L_m^2}{L_2}$ – эквивалентная

индуктивность асинхронного двигателя, Гн; L_m – результирующая индуктивность, обусловленная магнитным потоком в воздушном зазоре машины, Гн; z_p – число пар полюсов асинхронного двигателя; $\hat{\omega}(k)$ – оценка угловой скорости ротора на текущем шаге дискретизации, рад/с; $\hat{\omega}(k-1)$ – оценка угловой скорости ротора на предыдущем шаге дискретизации, рад/с; $k_{1\alpha}$, $k_{1\beta}$ – коэффициенты передачи отработки невязки токов статора в прямоугольной стационарной системе координат α, β , Ом. При первоначальной настройке наблюдателя данные коэффициенты рекомендуется принимать равными значению эквивалентного активного сопротивления асинхронного двигателя [22].

2. Корректировка полученных величин прогноза оценки токов статора $\hat{I}_{1\alpha}(k)$, $\hat{I}_{1\beta}(k)$ по выражениям (3), (4):

$$\hat{I}_{1\alpha}(k) = \hat{\tilde{I}}_{1\alpha}(k) + \hat{I}_{1\alpha}(k-1), \quad (3)$$

$$\hat{I}_{1\beta}(k) = \hat{\tilde{I}}_{1\beta}(k) + \hat{I}_{1\beta}(k-1). \quad (4)$$

3. Определение величины прогноза оценок потокосцепления ротора $\hat{\psi}_{2\alpha}(k)$, $\hat{\psi}_{2\beta}(k)$ на текущем шаге дискретизации согласно выражениям (5), (6):

$$\hat{\psi}_{2\alpha}(k) = \frac{\Delta t}{2} \left\{ \left[\begin{aligned} &\frac{R_2' L_m}{L_2} \hat{I}_{1\alpha}(k) - \frac{R_2'}{L_2} \hat{\psi}_{2\alpha}(k) - \\ &- z_p \hat{\psi}_{2\beta}(k) \hat{\omega}(k) \end{aligned} \right] + \left[\begin{aligned} &\frac{R_2' L_m}{L_2} \hat{I}_{1\alpha}(k-1) - \frac{R_2'}{L_2} \hat{\psi}_{2\alpha}(k-1) - \\ &- z_p \hat{\psi}_{2\beta}(k-1) \hat{\omega}(k-1) \end{aligned} \right] \right\}, \quad (5)$$

$$\hat{\psi}_{2\beta}(k) = \frac{\Delta t}{2} \left\{ \left[\begin{aligned} &\frac{R_2' L_m}{L_2} \hat{I}_{1\beta}(k) - \frac{R_2'}{L_2} \hat{\psi}_{2\beta}(k) + \\ &+ z_p \hat{\psi}_{2\alpha}(k) \hat{\omega}(k) \end{aligned} \right] + \left[\begin{aligned} &\frac{R_2' L_m}{L_2} \hat{I}_{1\beta}(k-1) - \frac{R_2'}{L_2} \hat{\psi}_{2\beta}(k-1) + \\ &+ z_p \hat{\psi}_{2\alpha}(k-1) \hat{\omega}(k-1) \end{aligned} \right] \right\}. \quad (6)$$

4. Корректировка полученных значений прогноза за оценок потокосцепления ротора $\hat{\psi}_{2\alpha}(k)$, $\hat{\psi}_{2\beta}(k)$ по выражениям (7), (8):

$$\hat{\psi}_{2\alpha}(k) = \hat{\tilde{\psi}}_{2\alpha}(k) + \hat{\psi}_{2\alpha}(k-1), \quad (7)$$

$$\hat{\psi}_{2\beta}(k) = \hat{\tilde{\psi}}_{2\beta}(k) + \hat{\psi}_{2\beta}(k-1), \quad (8)$$

5. Определение величины прогноза оценки момента сопротивления на валу $\hat{M}_C(k)$ на текущем шаге дискретизации согласно выражению (9):

$$\hat{M}_C(k) = \frac{1}{T_3} z_p \frac{3}{2} \frac{L_m}{L_2} \frac{\Delta t}{2} \left\{ \left[\begin{aligned} &\hat{\psi}_{2\alpha}(k) \{ I_{1\beta}(k) - \hat{I}_{1\beta}(k) \} - \\ &- \hat{\psi}_{2\beta}(k) \{ I_{1\alpha}(k) - \hat{I}_{1\alpha}(k) \} \end{aligned} \right] + \left[\begin{aligned} &\hat{\psi}_{2\alpha}(k-1) \{ I_{1\beta}(k-1) - \hat{I}_{1\beta}(k-1) \} - \\ &- \hat{\psi}_{2\beta}(k-1) \{ I_{1\alpha}(k-1) - \hat{I}_{1\alpha}(k-1) \} \end{aligned} \right] \right\}, \quad (9)$$

где $T_3 = 0,1 \cdot \frac{L_2}{R_2}$ – коэффициент интегральной отработки, с.

6. Корректировка оценки момента сопротивления на валу $\hat{M}_c(k)$ на текущем шаге дискретизации согласно выражению (10):

$$\hat{M}_c(k) = \hat{M}_c(k) + \hat{M}_c(k-1), \quad (10)$$

где $\hat{M}_c(k)$ – оценка момента сопротивления на валу на текущем шаге дискретизации; $\hat{M}_c(k-1)$ – оценка момента сопротивления на валу на предыдущем шаге дискретизации.

7. Определение величины оценки момента сопротивления на валу $\hat{M}_c(k)$ на текущем шаге дискретизации согласно выражению (11):

$$\begin{aligned} \hat{M}_c(k) = & k_3 z_p \frac{3}{2} \frac{L_m}{L_2} \left[\hat{\psi}_{2\alpha}(k) \{I_{1\beta}(k) - \hat{I}_{1\beta}(k)\} - \right. \\ & \left. - \hat{\psi}_{2\beta}(k) \{I_{1\alpha}(k) - \hat{I}_{1\alpha}(k)\} \right] + \hat{M}_c(k), \end{aligned} \quad (11)$$

где k_3 – коэффициент пропорциональной отработки, о.е.

8. Определение величины прогноза оценки угловой скорости ротора $\hat{\omega}(k)$ на текущем шаге дискретизации по выражению (12):

$$\begin{aligned} \hat{\omega}(k) = & \frac{1}{J} \frac{\Delta t}{2} \left\{ \left[\frac{3}{2} \frac{L_m}{L_2} z_p \left[\hat{I}_{1\beta}(k) \hat{\psi}_{2\alpha}(k) - \right. \right. \right. \\ & \left. \left. - \hat{I}_{1\alpha}(k) \hat{\psi}_{2\beta}(k) \right] - \hat{M}_c(k) \right] + \\ & + \left[\frac{3}{2} \frac{L_m}{L_2} z_p \left[\hat{I}_{1\beta}(k-1) \hat{\psi}_{2\alpha}(k-1) - \right. \right. \\ & \left. \left. - \hat{I}_{1\alpha}(k-1) \hat{\psi}_{2\beta}(k-1) \right] - \hat{M}_c(k-1) \right] \right\}, \end{aligned} \quad (12)$$

где J – эквивалентный момент инерции, приведенный к валу асинхронного двигателя, кг·м².

9. Корректировка величины прогноза оценки угловой скорости ротора $\hat{\omega}(k)$ по выражению (13):

$$\hat{\omega}(k) = \hat{\omega}(k) + \hat{\omega}(k-1). \quad (13)$$

Структурная схема разработанного наблюдателя представлена на рис. 1.

Дальнейшие исследования разработанного наблюдателя с оперативным мониторингом угловой скорости ротора и момента сопротивления на валу погружного асинхронного двигателя будут производиться с помощью средств моделирования. Основные параметры двигателя сведены в табл. 1.

Коэффициент пропорциональной отработки k_3 зависит от параметров ПЭД. Для исследуемого погружного электродвигателя, параметры которого

приведены в табл. 1, при первоначальной настройке наблюдателя коэффициент пропорциональной отработки принимается равным 300.

Таблица 1. Параметры схемы замещения моделируемого асинхронного двигателя

Table 1. Parameters of simulated induction motor

R_1	R_2	L_1	L_2	L_m	z_p
Ом/Ohm		мГн/mH			
2,852	2,785	44,5	44,9	43,45	2

Исследование наблюдателя при отработке несогласованности начальных условий

Одним из важных показателей устойчивости разработанного наблюдателя является способность отработки несогласованности начальных условий наблюдателя и реального процесса. Результаты моделирования угловой скорости ротора погружного электродвигателя в режиме пуска и оценок наблюдателя при несогласованности начальных условий приведены на рис. 2.

Анализ переходных характеристик показал, что вне зависимости от величины рассогласования начальных условий первое достижение наблюдателем значения угловой скорости, полученного с помощью модели погружного электродвигателя, происходит в момент времени равный 0,006 с.

Далее процесс мониторинга скорости стабилизируется, и после 0,02 с наблюдатель начинает оценивать угловую скорость с погрешностью относительно модельной не более 5 %, что является допустимым в инженерной практике.

Исследование наблюдателя при отработке изменяющейся нагрузки на валу

Следующим немаловажным фактором для наблюдателя является возможность работы при условии изменяющейся нагрузки на валу. При этом вне зависимости от типа и величины нагрузки наблюдатель должен выдавать точные оценки значения угловой скорости ротора (рис. 3) и момента сопротивления на валу двигателя (рис. 4). Интегральная погрешность оценивания угловой скорости ротора наблюдателем приведена в табл. 2 и вычислена по выражению (14):

$$\Delta\omega = \frac{\int_{t_{\text{нач}}}^{t_{\text{конеч}}} |\omega(t) - \hat{\omega}(t)| \cdot dt}{\int_{t_{\text{нач}}}^{t_{\text{конеч}}} |\omega(t)| \cdot dt} \cdot 100 \%, \quad (14)$$

где $t_{\text{нач}}$ и $t_{\text{конеч}}$ – начальный и конечный момент интервала интегрирования в течение переходного и установившегося процесса.

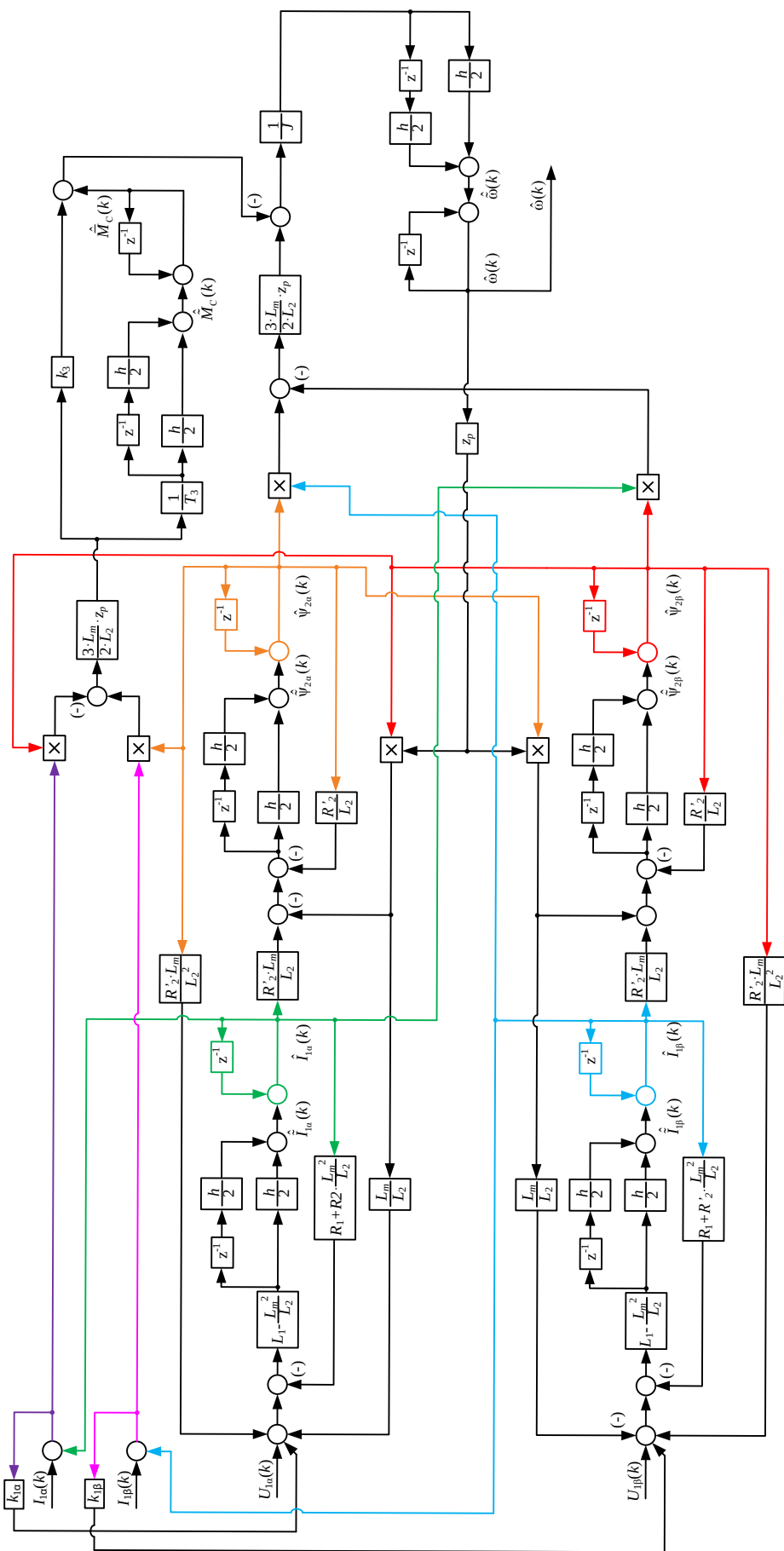


Рис. 1. Структурная схема разработанного наблюдателя
 Fig. 1. Schematic structure of the developed observer

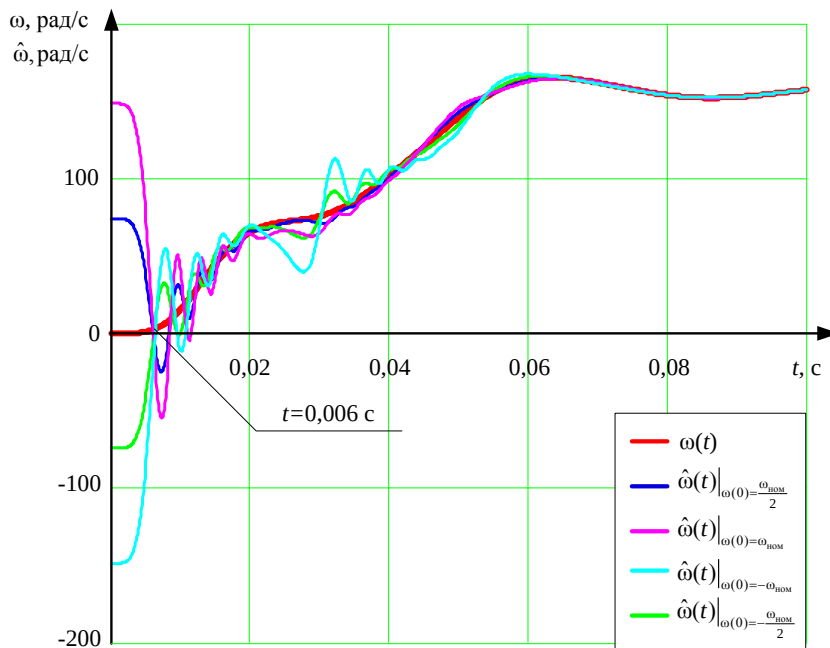


Рис. 2. Переходные характеристики угловой скорости ротора погружного электродвигателя $\omega(t)$ и ее оценок с помощью наблюдателя $\hat{\omega}(t)$ при разных начальных условиях

Fig. 2. Transient processes of submersible induction motor speed $\omega(t)$ and speed estimation $\hat{\omega}(t)$ under different initial conditions

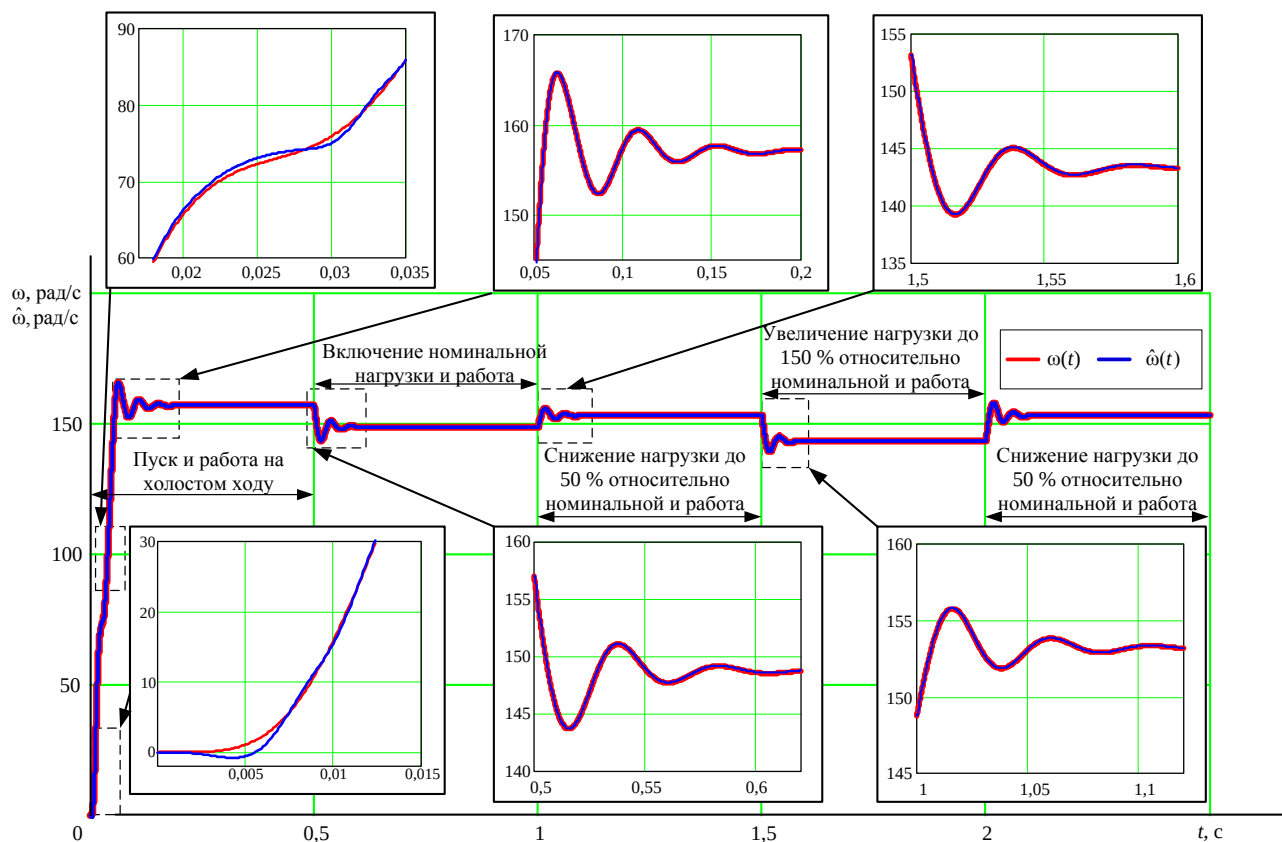


Рис. 3. Переходные характеристики угловой скорости ротора погружного электродвигателя $\omega(t)$ и ее оценок с помощью наблюдателя $\hat{\omega}(t)$ при изменяющейся нагрузке на валу

Fig. 3. Transient processes of submersible induction motor speed $\omega(t)$ and speed estimation $\hat{\omega}(t)$ under varying load torque

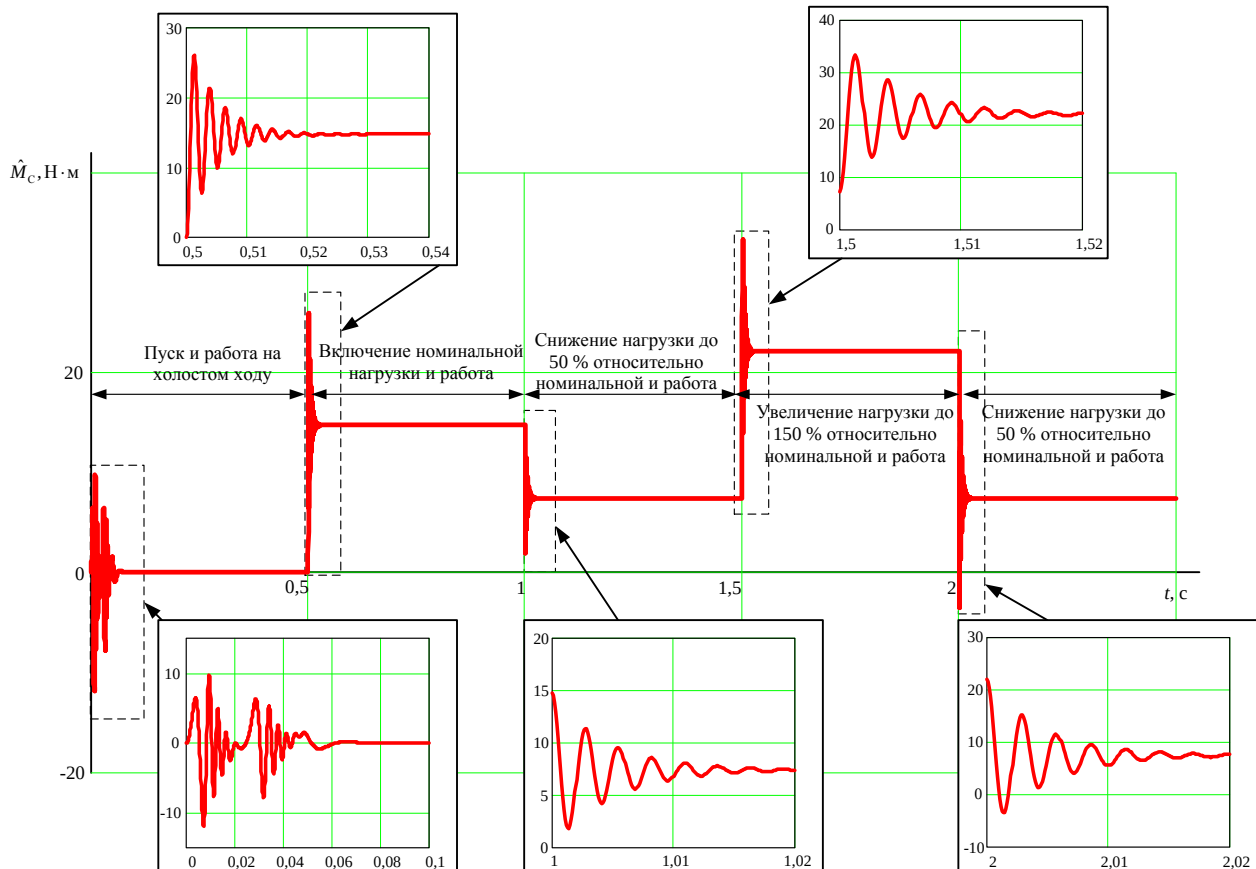


Рис. 4. Переходные процессы момента сопротивления на валу погружного электродвигателя $\hat{M}_c(t)$ при изменяющейся нагрузке на валу

Fig. 4. Transient processes of submersible induction motor load torque estimation $\hat{M}_c(t)$ under varying load torque

Таблица 2. Погрешности оценивания угловой скорости ротора погружного электродвигателя для рассматриваемых режимов работы

Table 2. Errors of submersible motor speed estimation in all static and dynamic operating modes under consideration

Режим работы Operation mode	$t_{\text{нач}}$	$t_{\text{конеч}}$	$t_{\text{нач}} - t_{\text{конеч}}$	$\Delta\omega$
	с/сек			%
Пуск на холостом ходу/Idle start	0	0,1	0,1	0,03
Работа на холостом ходу/Idling	0,1	0,5	0,4	0,01
Включение номинальной нагрузки/Rated load torque	0,5	0,6	0,1	0,03
Работа в номинальном режиме/Operation in nominal mode	0,6	1,0	0,4	0,03
Снижение нагрузки до 50 % относительно номинальной Load reduction up to 50% relative to nominal	1,0	1,1	0,1	0,02
Работа в режиме 50 % относительно номинальной нагрузки Operating at 50% relative to rated load	1,1	1,5	0,4	0,02
Увеличение нагрузки до 150 % относительно номинальной Load increase up to 150% relative to rated load	1,5	1,6	0,1	0,05
Работа в режиме 150 % относительно номинальной нагрузки Operating at 150% relative to rated load	1,6	2,0	0,4	0,05
Снижение нагрузки до 50 % относительно номинальной Load reduction up to 50% relative to nominal	2,0	2,1	0,1	0,01
Работа в режиме 50 % относительно номинальной нагрузки Operating at 50% relative to rated load	2,1	2,5	0,4	0,01

Исследуем наблюдатель при пуске электродвигателя при номинальной нагрузке, которая носит активный характер. В данном случае не учитываются потери на трение и в подшипниках. Результа-

ты исследования приведены на рис. 5. Интегральная погрешность на всем промежутке времени от 0 до 0,1 секунды составила 1,2 %.

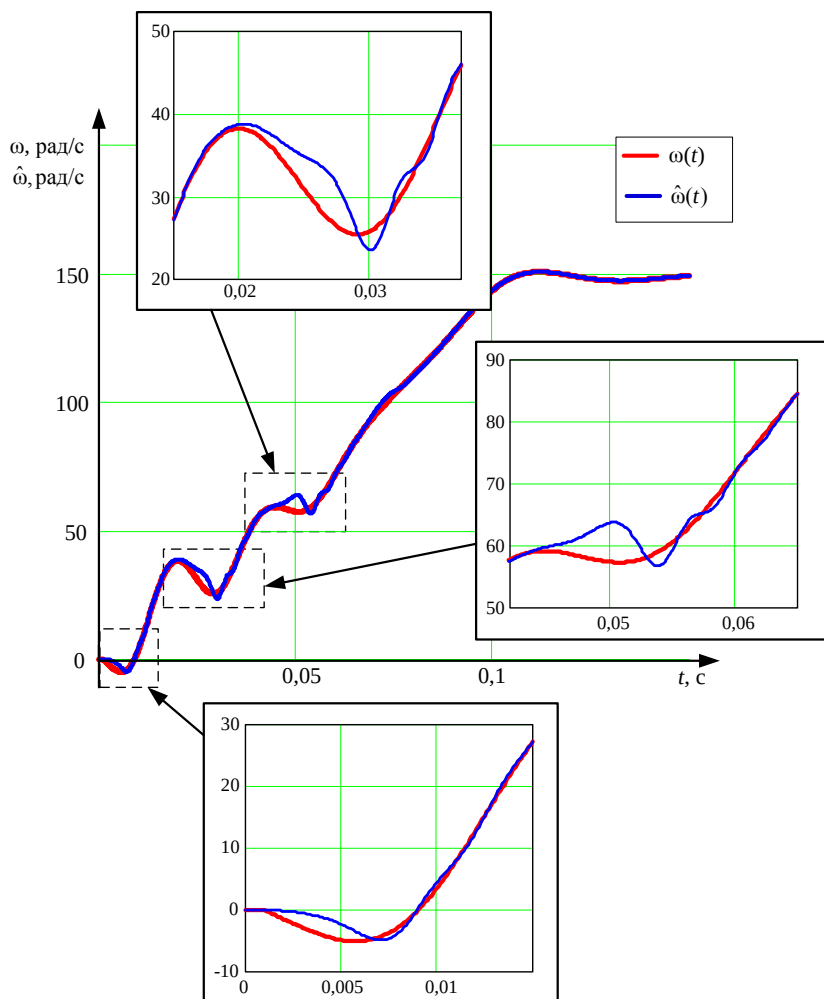


Рис. 5. Переходные характеристики угловой скорости ротора погружного электродвигателя $\omega(t)$ и ее оценок с помощью наблюдателя $\hat{\omega}(t)$ в режиме пуска при номинальной нагрузке

Fig. 5. Transient processes of submersible induction motor speed $\omega(t)$ and speed estimation $\hat{\omega}(t)$ under starting the engine at rated load

Анализ рис. 2–4 и табл. 1 показал, что разработанный наблюдатель даже при условии изменения нагрузки на валу и пуске электродвигателя в нагруженном состоянии получает устойчивые оценки скорости ротора и момента сопротивления на валу. Интегральная погрешность оценки угловой скорости относительно модельных значений составляет не более 1,2 %, что допустимо в системах управления ПЭД.

Исследование наблюдателя при изменении параметров двигателя в ходе работы

Известно, что в ходе работы электродвигателя происходит изменение его параметров, вызванное нагревом. Поэтому важно, чтобы разработанный наблюдатель, модель которого завязана на параметрах электродвигателя, продолжал производить оценку наблюдаемых параметров даже при условии изменения в ходе работы части или всех параметров. Про-

ведем исследование наблюдателя при изменении активных сопротивлений статора и ротора в диапазоне от –25 до +25 % от номинальных значений (рис. 6–9). Интегральная погрешность оценивания угловой скорости наблюдателем приведена в табл. 3–6.

Анализ рис. 6–9 и табл. 3–6 показал, что разработанный наблюдатель дает оценки угловой скорости ротора с интегральной погрешностью не более 5 % при изменении активного сопротивления статора и ротора в диапазоне от –25 до +25 % относительно номинального значения. В режиме пуска электродвигателя при уменьшении активного сопротивления ротора на 25 % относительно номинального значения погрешность составляет 5,53 %, что допустимо в инженерной практике. Это свойство наблюдателя делает его удобным в применении с идентификаторами параметров асинхронных двигателей, особенно при изменении параметров во время работы электродвигателя.

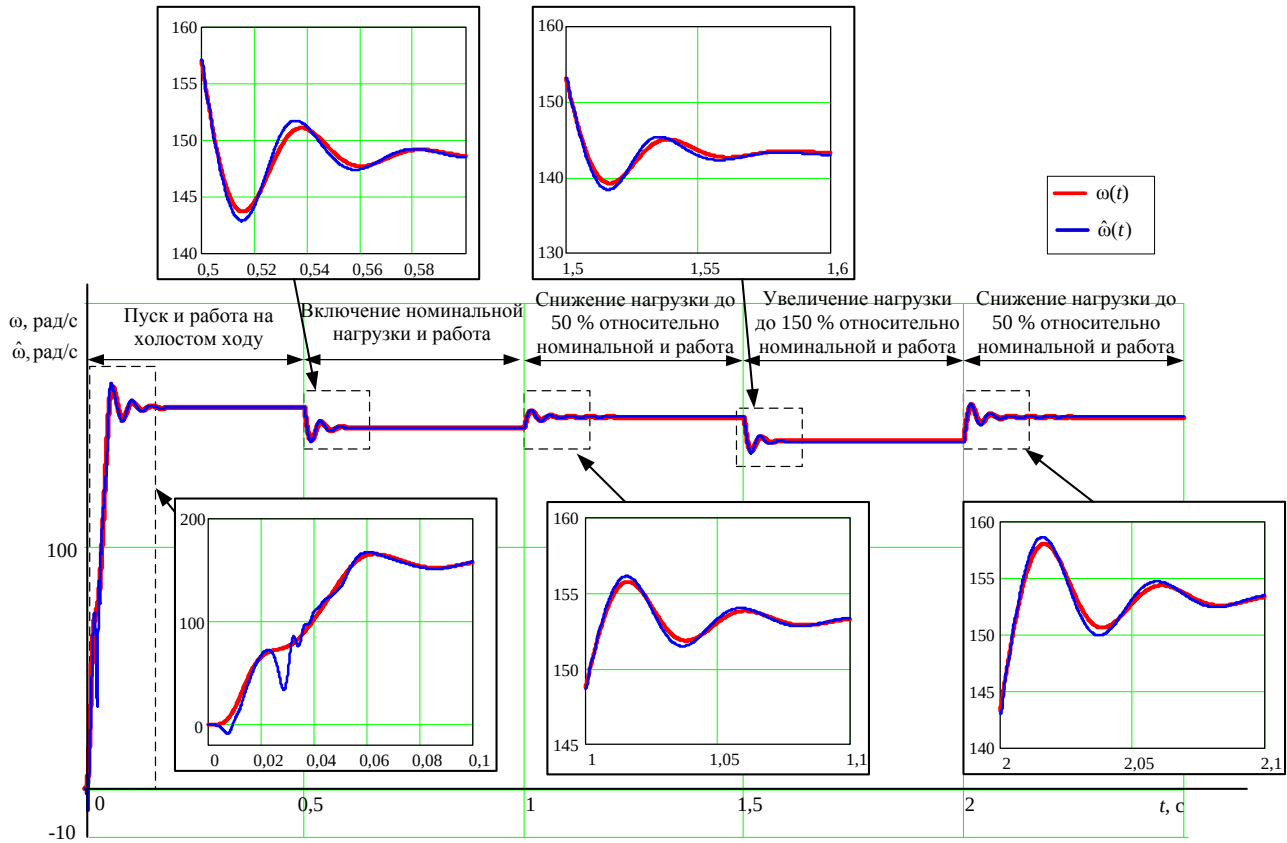


Рис. 6. Переходные характеристики угловой скорости ротора погружного электродвигателя $\omega(t)$ и ее оценок с помощью наблюдателя $\hat{\omega}(t)$ при увеличении активного сопротивления статора на 25 % относительно номинального значения

Fig. 6. Transient processes of submersible induction motor speed $\omega(t)$ and speed estimation $\hat{\omega}(t)$ with the stator active resistance value increases by 25% of the nominal value

Таблица 3. Погрешности оценивания угловой скорости ротора погружного электродвигателя в исследуемых статических и динамических режимах работы при увеличении активного сопротивления статора на 25 % относительно номинального значения

Table 3. Errors of submersible motor speed estimation in all static and dynamic operating modes with the stator active resistance value increased by 25% of the nominal value

Режим работы Operation mode	$t_{\text{нач}}$	$t_{\text{конец}}$	$t_{\text{нач}} - t_{\text{конец}}$	$\Delta\omega$
	с/сек			%
Пуск на холостом ходу/Idle start	0	0,1	0,1	2,45
Работа на холостом ходу/Idling	0,1	0,5	0,4	0,02
Включение номинальной нагрузки/Rated load torque	0,5	0,6	0,1	0,03
Работа в номинальном режиме/Operation in nominal mode	0,6	1,0	0,4	0,03
Снижение нагрузки до 50 % относительно номинальной Load reduction up to 50% relative to nominal	1,0	1,1	0,1	0,01
Работа в режиме 50 % относительно номинальной нагрузки Operating at 50% relative to rated load	1,1	1,5	0,4	0,01
Увеличение нагрузки до 150 % относительно номинальной Load increase up to 150% relative to rated load	1,5	1,6	0,1	0,14
Работа в режиме 150 % относительно номинальной нагрузки Operating at 150% relative to rated load	1,6	2,0	0,4	0,16
Снижение нагрузки до 50 % относительно номинальной Load reduction up to 50% relative to nominal	2,0	2,1	0,1	0,01
Работа в режиме 50 % относительно номинальной нагрузки Operating at 50% relative to rated load	2,1	2,5	0,4	0,01

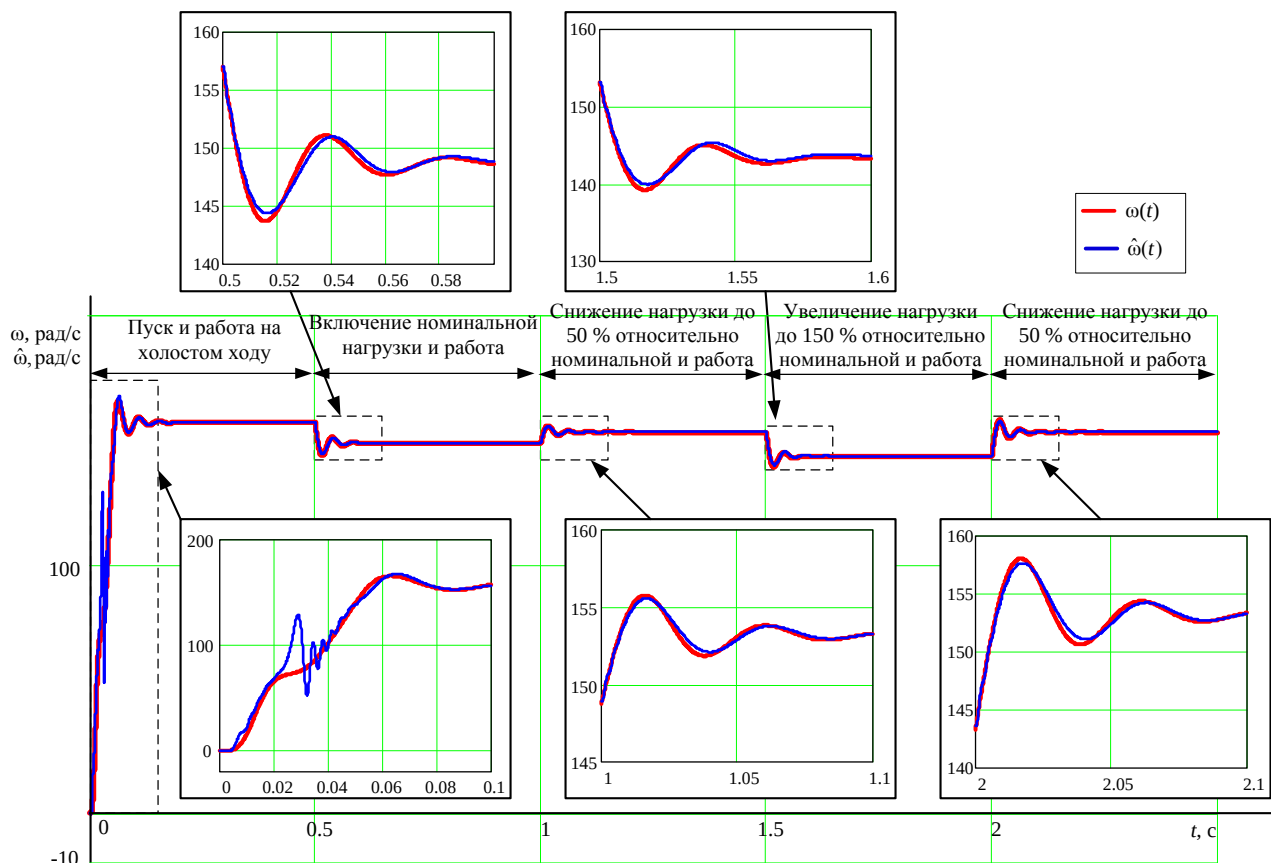


Рис. 7. Переходные характеристики угловой скорости ротора погружного электродвигателя $\omega(t)$ и ее оценок с помощью наблюдателя $\hat{\omega}(t)$ при уменьшении активного сопротивления статора на 25% относительно номинального значения

Fig. 7. Transient processes of submersible induction motor speed $\omega(t)$ and speed estimation $\hat{\omega}(t)$ with the stator active resistance value decreased by 25% of the nominal value

Таблица 4. Погрешности оценивания угловой скорости ротора погружного электродвигателя в исследуемых статических и динамических режимах работы при уменьшении активного сопротивления статора на 25 % относительно номинального значения

Table 4. Errors of submersible motor speed estimation in all static and dynamic operating modes with the stator active resistance value decreased by 25% of the nominal value

Режим работы Operation mode	$t_{\text{нач}}$	$t_{\text{конеч}}$	$t_{\text{нач}} - t_{\text{конеч}}$	$\Delta\omega$
	с/сек			%
Пуск на холостом ходу/Idle start	0	0,1	0,1	2,95
Работа на холостом ходу/Idling	0,1	0,5	0,4	0,01
Включение номинальной нагрузки/Rated load torque	0,5	0,6	0,1	0,09
Работа в номинальном режиме/Operation in nominal mode	0,6	1,0	0,4	0,09
Снижение нагрузки до 50 % относительно номинальной Load reduction up to 50% relative to nominal	1,0	1,1	0,1	0,02
Работа в режиме 50 % относительно номинальной нагрузки Operating at 50% relative to rated load	1,1	1,5	0,4	0,02
Увеличение нагрузки до 150 % относительно номинальной Load increase up to 150% relative to rated load	1,5	1,6	0,1	0,23
Работа в режиме 150 % относительно номинальной нагрузки Operating at 150% relative to rated load	1,6	2,0	0,4	0,24
Снижение нагрузки до 50 % относительно номинальной Load reduction up to 50% relative to nominal	2,0	2,1	0,1	0,02
Работа в режиме 50 % относительно номинальной нагрузки Operating at 50% relative to rated load	2,1	2,5	0,4	0,02

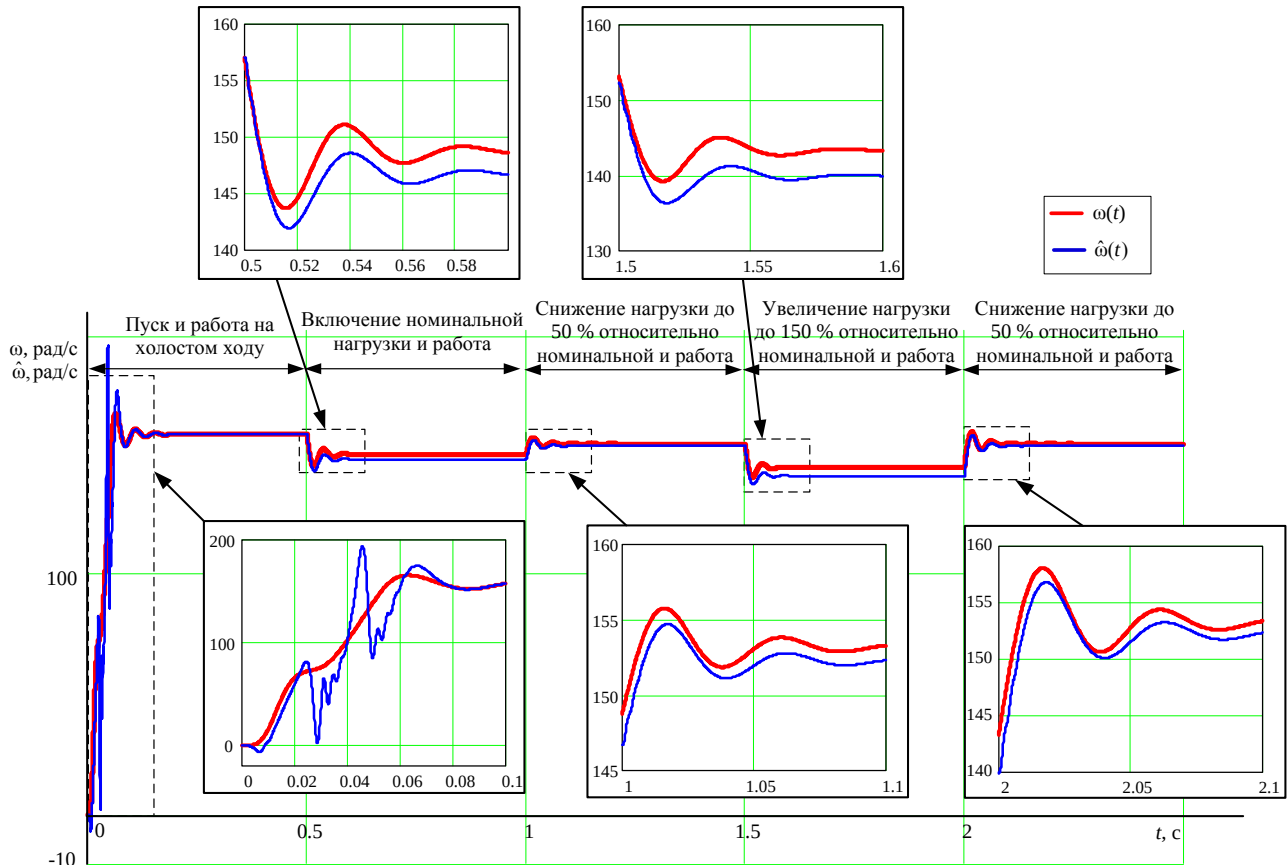


Рис. 8. Переходные характеристики угловой скорости ротора погружного электродвигателя $\omega(t)$ и ее оценок с помощью наблюдателя $\hat{\omega}(t)$ при увеличении активного сопротивления ротора на 25% относительно номинального значения

Fig. 8. Transient processes of submersible induction motor speed $\omega(t)$ and speed estimation $\hat{\omega}(t)$ with the rotor active resistance value increased by 25% of the nominal value

Таблица 5. Погрешности оценивания скорости вала погружного электродвигателя в исследуемых статических и динамических режимах работы при увеличении активного сопротивления ротора на 25 % от номинального значения

Table 5. Errors of submersible motor speed estimation in all static and dynamic operating modes with the rotor active resistance value increased by 25% of the nominal value

Режим работы Operation mode	$t_{\text{нач}}$	$t_{\text{конец}}$	$t_{\text{нач}} - t_{\text{конец}}$	$\Delta\omega$
	с/сек			%
Пуск на холостом ходу/Idle start	0	0,1	0,1	4,92
Работа на холостом ходу/Idling	0,1	0,5	0,4	0,01
Включение номинальной нагрузки/Rated load torque	0,5	0,6	0,1	1,28
Работа в номинальном режиме/Operation in nominal mode	0,6	1,0	0,4	1,36
Снижение нагрузки до 50 % относительно номинальной Load reduction up to 50% relative to nominal	1,0	1,1	0,1	0,67
Работа в режиме 50 % относительно номинальной нагрузки Operating at 50% relative to rated load	1,1	1,5	0,4	0,62
Увеличение нагрузки до 150 % относительно номинальной Load increase up to 150% relative to rated load	1,5	1,6	0,1	2,22
Работа в режиме 150 % относительно номинальной нагрузки Operating at 150% relative to rated load	1,6	2,0	0,4	2,35
Снижение нагрузки до 50 % относительно номинальной Load reduction up to 50% relative to nominal	2,0	2,1	0,1	0,75
Работа в режиме 50 % относительно номинальной нагрузки Operating at 50% relative to rated load	2,1	2,5	0,4	0,62

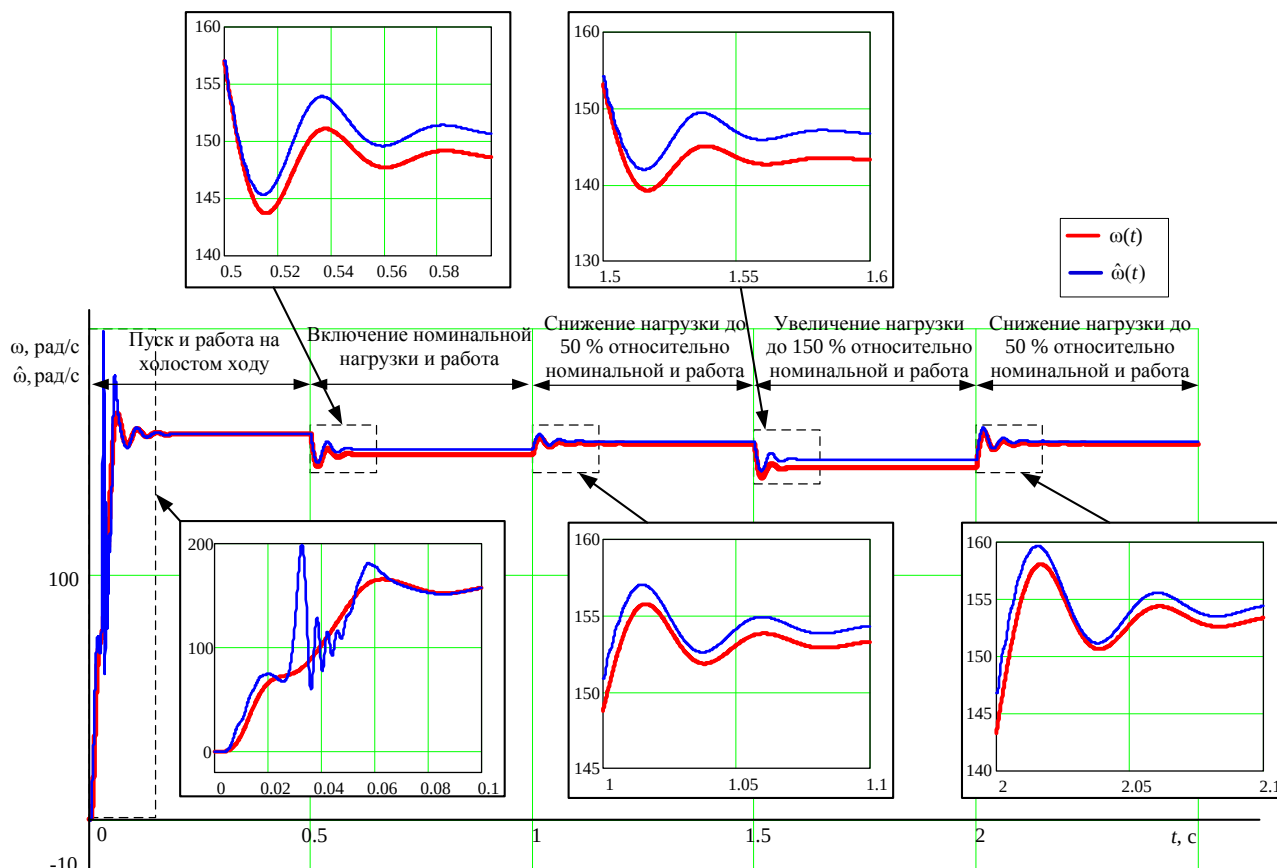


Рис. 9. Переходные характеристики угловой скорости ротора погружного электродвигателя $\omega(t)$ и ее оценок с помощью наблюдателя $\hat{\omega}(t)$ при уменьшении активного сопротивления ротора на 25 % относительно номинального значения

Fig. 9. Transient processes of submersible induction motor speed $\omega(t)$ and speed estimation $\hat{\omega}(t)$ with the rotor active resistance value decreases by 25% of the nominal value

Таблица 6. Погрешности оценивания угловой скорости ротора погружного электродвигателя в исследуемых статических и динамических режимах работы при уменьшении активного сопротивления ротора на 25 % от номинального значения

Table 6. Errors of submersible motor speed estimation in all static and dynamic operating modes with the rotor active resistance value decreases by 25% of the nominal value

Режим работы Operation mode	$t_{нач}$	$t_{конеч}$	$t_{нач}-t_{конеч}$	$\Delta\omega$
	с/сек			%
Пуск на холостом ходу/Idle start	0	0,1	0,1	5,53
Работа на холостом ходу/Idling	0,1	0,5	0,4	0,01
Включение номинальной нагрузки/Rated load torque	0,5	0,6	0,1	1,35
Работа в номинальном режиме/Operation in nominal mode	0,6	1,0	0,4	1,42
Снижение нагрузки до 50 % относительно номинальной Load reduction up to 50% relative to nominal	1,0	1,1	0,1	0,69
Работа в режиме 50 % относительно номинальной нагрузки Operating at 50% relative to rated load	1,1	1,5	0,4	0,65
Увеличение нагрузки до 150 % относительно номинальной Load increase up to 150% relative to rated load	1,5	1,6	0,1	2,32
Работа в режиме 150 % относительно номинальной нагрузки Operating at 150% relative to rated load	1,6	2,0	0,4	2,43
Снижение нагрузки до 50 % относительно номинальной Load reduction up to 50% relative to nominal	2,0	2,1	0,1	0,77
Работа в режиме 50 % относительно номинальной нагрузки Operating at 50% relative to rated load	2,1	2,5	0,4	0,65

Выводы

1. Показана актуальность и целесообразность разработки наблюдателя с оперативным мониторингом угловой скорости ротора и момента сопротивления на валу погружного асинхронного двигателя как средства информационного назначения.
2. Разработана структура наблюдателя с оперативным мониторингом угловой скорости ротора и момента сопротивления на валу погружного асинхронного двигателя.
3. Проведена проверка работоспособности и эффективности наблюдателя при отработке несогласованности начальных условий. Выявлено, что оценки угловой скорости ротора вне зависимости от величины рассогласования достигают значения скорости, полученной с помощью модели электродвигателя в момент времени равный 0,006 с. Далее процесс оценивания угловой скорости стабилизируется, и после 0,02 с наблюдатель оценивает скорость с погрешностью относительно модельной в пределах допустимой. Полученные данные свидетельствуют о возможности применения разработанного наблюдателя в любых процессах добычи нефти, так как стабилизация рассогласования происходит быстрее, чем процессы пуска электродвигателя.
4. Проведена проверка работоспособности и эффективности наблюдателя при отработке изменяющейся нагрузки на валу двигателя. Выявлено, что разработанный наблюдатель при изменении нагрузки на валу, перегрузке и пуске в нагруженном состоянии получает устойчивые оценки угловой скорости ротора и момента сопротивления на валу погружного асинхронного двигателя. Интегральная погрешность оценки угловой скорости ротора относительно значений, полученных с помощью модели, составляет не более 1,2 %, что допустимо в системах управления погружными электродвигателями.
5. Проведена проверка работоспособности и эффективности наблюдателя при изменении параметров двигателя в ходе работы. Выявлено, что для диапазона изменения параметров от –25 до +25 % относительно номинальных значений наблюдатель корректно оценивает угловую скорость ротора с погрешностью не более 5 % для большинства режимов работы. Это позволяет применять его с идентификаторами параметров электродвигателей с целью разработки замкнутых систем управления.

СПИСОК ЛИТЕРАТУРЫ

1. Камалетдинов Р.С. Механизированная добыча нефти: новые вызовы – новые решения // Деловой журн. Neftegaz.RU. – 2023. – № 4 (136). – С. 42–47.
2. РуссНефть. Производство. Добыча нефти. URL: <https://www.russneft.ru/production/oil/> (дата обращения 15.03.2024).
3. Прогноз долгосрочного социально-экономического развития РФ на период до 2030 года. URL: <http://static.government.ru/media/files/41d457592e04b76338b7.pdf> (дата обращения 15.03.2024).
4. World Energy Outlook 2023. URL: <https://iea.blob.core.windows.net/assets/42b23c45-78bc-4482-b0f9-eb826ae2da3d/WorldEnergyOutlook2023.pdf> (дата обращения 15.03.2024).
5. Романов В.С., Гольдштейн В.Г. Повышение надежности электротехнического комплекса электрооборудования нефтедобычи на основе анализа его аварийности // Электротехнические системы и комплексы. – 2018. – № 3 (40). – С. 20–26. DOI: 10.18503/2311-8318-2018-3(40)-20-26.
6. Рукин М.В., Молчанова В.А., Уразов К.Р. Методика определения наработки на отказ установки электроцентробежного насоса // Известия Томского политехнического университета. Инжиниринг георесурсов. – 2022. – Т. 333. – № 11. – С. 219–229. DOI: 10.18799/24131830/2022/12/3792.
7. Escobar J.A., Romero A.F., Lobo-Guerrero J. Failure analysis of submersible pump system collapse caused by assembly bolt crack propagation by stress corrosion cracking // Engineering Failure Analysis. – 2016. – Vol. 60. – P. 1–8. DOI: 10.1016/j.engfailanal.2015.11.044.
8. On the optimization of the periodic mode of well production, which is operated by submersible electric pumps in Rosneft Oil Company (Russian) / A.A. Pashali, R.S. Khalifin, D.V. Silnov, A.S. Topolnikov, B.M. Latypov // OIJ. – 2021. – P. 92–96. DOI: 10.24887/0028-2448-2021-4-92-96.
9. Надежность погружных нефтяных насосов при периодической эксплуатации / Е.А. Лихачева, В.Г. Островский, Н.А. Лыкова, А.Н. Мусинский, П.А. Байдаров // ПРОнефть. Профессионально о нефти. – 2021. – Т. 6. – № 1. – С. 54–58. DOI: 10.51890/2587-7399-2021-6-1-54-58.
10. Кладиев С.Н. Обзор и критический анализ современного состояния, путей развития технологического процесса добычи нефти электроприводным способом в прерывистых режимах эксплуатации мало- и среднедебитных скважин // Известия Томского политехнического университета. Инжиниринг георесурсов. – 2023. – Т. 334. – № 8. – С. 220–231. DOI: 10.18799/24131830/2023/8/4349.
11. Разработка наблюдателя полного порядка с оперативным мониторингом момента сопротивления для погружных асинхронных электродвигателей / А.С. Глазырин, С.Н. Кладиев, К.С. Афанасьев, В.В. Тимошкин, И.Г. Слепнёв, В.И. Полищук // Известия Томского политехнического университета. Инжиниринг георесурсов. – 2018. – Т. 329. – № 2. – С. 118–126.
12. Kwon Y.A., Kim S.K. A high-performance strategy for sensorless induction motor drive using variable link voltage // IEEE Trans Power Electron. – 2007. – Vol. 22 – № 1. – P. 329–332. DOI: 10.1109/TPEL.2006.887178.

13. Electrical submersible pump complex model for sensorless parameters observing / R. Iudin, A. Petrochenkov, B. Krause, E. Solodkiy, G. Panchenko // 2021 IEEE 62nd International Scientific Conference on Power and Electrical Engineering of Riga Technical University. – Riga, Latvia, 2021. – P. 1–5. DOI: 10.1109/RTUCON53541.2021.9711743.
14. Rabbi S.F., Constantine M., Rahman M.A. A novel sensorless IPM motor drive for electric submersible pumps // 2017 IEEE International Electric Machines and Drives Conference. – Miami, FL, USA, 2017. – P. 1–8. DOI: 10.1109/IEMDC.2017.8002199.
15. Improved speed sensorless vector control algorithm of induction motor based on long cable / Y. Deng, Z. Liang, P. Xi, X. Zuo // Journal of Electrical Engineering & Technology. – 2019. – Vol. 14. – P. 219–229. DOI: 10.1007/s42835-018-00023-7.
16. Kozlova L., Bolovin E., Payuk L. Angular velocity's neural network observer of the electric drive of TVR – IM Type implemented in software environment LabVIEW // IOP Conference Series: Materials Science and Engineering. – Tomsk, Russia, 2016. – P. 1–6. DOI: 10.1088/1757-899X/132/1/012005.
17. Определение параметров схемы замещения погружного электродвигателя на основании данных испытаний / С.С. Шубин, В.У. Ямалиев, А.С. Глазырин, Д.С. Буньков, С.Н. Кладиев, И.В. Раков, Е.В. Боловин, В.З. Ковалев, Р.Н. Хамитов // Известия Томского политехнического университета. Инжиниринг георесурсов. – 2021. – Т. 332. – № 1. – С. 204–214. DOI: 10.18799/24131830/2021/1/3013
18. Montoya O.D., De Angelo Cr.H., Bossio G. Parametric estimation in three-phase induction motors using torque data via the generalized normal distribution optimizer // Results in Engineering. – 2024. – Vol. 23. – P. 1–8. DOI: 10.1016/j.rineng.2024.102446
19. Elkholy M.M., El-Hay E.A., El-Fergany A.A. Synergy of electrostatic discharge optimizer and experimental verification for parameters estimation of three phase induction motors // Engineering Science and Technology, an International Journal. – 2022. – Vol. 31. – P. 1–10. DOI: 10.1016/j.jestch.2021.09.013
20. Удут Л.С., Мальцева О.П., Кояин Н.В. Проектирование и исследование автоматизированных электроприводов. Ч. 8. Асинхронный частотно-регулируемый электропривод. – Томск: Изд-во Томского политехнического университета, 2014. – 648 с.
21. Indragandhi V., Subramaniaswamy V., Selvamathi R. Electric motor drives and their applications with simulation practices. – USA: Cambridge, Academic Press, 2022. – 507 p.
22. Афанасьев К.С. Разработка наблюдателя состояния для асинхронного электропривода с повышенной параметрической робастностью: дис. ... канд. техн. наук. – Томск, 2015. – 106 с.

Информация об авторах

Александр Савельевич Глазырин, доктор технических наук, профессор отделения электроэнергетики и электротехники Инженерной школы энергетики Национального исследовательского Томского политехнического университета, Россия, 634050, г. Томск, пр. Ленина, 30; профессор Политехнической школы Югорского государственного университета, Россия, 628012, г. Ханты-Мансийск, ул. Чехова, 16. asglazyrin@tpu.ru; <https://orcid.org/0000-0003-4138-5982>

Семен Семенович Попов, аспирант отделения электроэнергетики и электротехники Инженерной школы энергетики Национального исследовательского Томского политехнического университета, Россия, 634050, г. Томск, пр. Ленина, 30; инженер-программист ООО «НПФ Мехатроника-Про», Россия, г. Томск, пр. Фрунзе, 119е. ssp14@tpu.ru; <https://orcid.org/0009-0004-4139-8032>

Евгений Игоревич Попов, ассистент кафедры электроэнергетики Тюменского индустриального университета, Россия, 625000, г. Тюмень, ул. Володарского, 38; porovei72@mail.ru

Владимир Анатольевич Копырин, кандидат технических наук, доцент кафедры электроэнергетики Тюменского индустриального университета, Россия, 625000, г. Тюмень, ул. Володарского, 38. korunva@gmail.com; <https://orcid.org/0000-0002-7515-4018>

Рустам Нуриманович Хамитов, доктор технических наук, профессор кафедры электроэнергетики Тюменского индустриального университета, Россия, 625000, г. Тюмень, ул. Володарского, 38; профессор кафедры электрической техники Энергетического института, Омский государственный технический университет, Россия, 644050, г. Омск, пр. Мира, 11. apple_27@mail.ru; <https://orcid.org/0000-0001-9876-5471>

Александр Александрович Филипас, кандидат технических наук, доцент отделения автоматизации и робототехники Инженерной школы информационных технологий и робототехники Национального исследовательского Томского политехнического университета, Россия, 634050, г. Томск, пр. Ленина, 30. filipas@tpu.ru; <https://orcid.org/0000-0002-5376-5416>

Вадим Владимирович Тимошкин, кандидат технических наук, доцент отделения автоматизации и робототехники Инженерной школы информационных технологий и робототехники Национального исследовательского Томского политехнического университета, Россия, 634050, г. Томск, пр. Ленина, 30. timoshkinvv@tpu.ru; <https://orcid.org/0000-0001-5116-5508>

Евгения Александровна Беляускене, старший преподаватель отделения математики и математической физики Инженерная школа ядерных технологий Национального исследовательского Томского политехнического университета, Россия, 634050, г. Томск, пр. Ленина, 30; eam@tpu.ru; <https://orcid.org/0000-0002-1638-4366>

Юлия Олеговна Кулеш, инженер отделения автоматизации и робототехники Инженерной школы информационных технологий и робототехники Национального исследовательского Томского политехнического университета, Россия, 634050, г. Томск, пр. Ленина, 30. yok13@tpu.ru

Евгений Владимирович Боловин, кандидат технических наук, доцент отделения электроэнергетики и электротехники Инженерной школы энергетики Национального исследовательского Томского политехнического университета, Россия, 634050, г. Томск, пр. Ленина, 30; инженер-программист ООО ИНТ АО «Эле-Си», Россия, 634021, г. Томск, ул. Алтайская, 161А. orange@tpu.ru; <https://orcid.org/0000-0002-8483-8999>

Владимир Захарович Ковалев, доктор технических наук, профессор Политехнической школы Югорского государственного университета, Россия, 628012, г. Ханты-Мансийск, ул. Чехова, 16; профессор отделения автоматизации и робототехники Инженерной школы информационных технологий и робототехники Национального исследовательского Томского политехнического университета, Россия, 634050, г. Томск, пр. Ленина, 30. vz_kovalev@mail.ru; <https://orcid.org/0000-0002-4512-6868>

Марина Витальевна Денеко, кандидат педагогических наук, доцент кафедры иностранных языков Московского технического университета связи и информатики, Россия, 111024, г. Москва, ул. Авиамоторная, 8А. denekomarina585@gmail.com; <https://orcid.org/0000-0003-4162-375X>

Поступила в редакцию: 26.07.2024

Поступила после рецензирования: 12.08.2024

Принята к публикации: 10.09.2024

REFERENCES

1. Kamaletdinov R.S. Mechanized oil production: new challenges – new solutions. *Business magazine Neftegaz.RU*, 2023, no. 4 (136), pp. 42–47. (In Russ.)
2. *RussNeft. Production. Oil production*. (In Russ.) Available at: <https://www.russneft.ru/production/oil/> (accessed 15 March 2024).
3. *Forecast of long-term socio-economic development of the Russian Federation for the period until 2030*. (In Russ.) Available at: <http://static.government.ru/media/files/41d457592e04b76338b7.pdf> (accessed 15 March 2024).
4. *World Energy Outlook 2023*. Available at: <https://iea.blob.core.windows.net/assets/42b23c45-78bc-4482-b0f9-eb826ae2da3d/WorldEnergyOutlook2023.pdf> (accessed 15 March 2024).
5. Romanov V.S., Goldstein V.G. Improving the reliability of electrical engineering complex of submersible electric equipment of oil production based on the analysis of its emergency. *Electrotechnical Systems and Complexes*, 2018, no. 3 (40), pp. 20–26. (In Russ.) DOI: 10.18503/2311-8318-2018-3(40)-20-26.
6. Rukin M.V., Molchanova M.V., Urazakov K.R. Method for determining the mean time between failures of esp units. *Bulletin of the Tomsk Polytechnic University. Geo Assets Engineering*, 2022, vol. 333, no 11. pp. 219–229. (In Russ.) DOI: 10.18799/24131830/2022/12/3792.
7. Escobar J.A., Romero A.F., Lobo-Guerrero J. Failure analysis of submersible pump system collapse caused by assembly bolt crack propagation by stress corrosion cracking. *Engineering Failure Analysis*, 2016, vol. 60. pp. 1–8. DOI: 10.1016/j.engfailanal.2015.11.044.
8. Pashali A.A., Khalfin R.S., Silnov D.V., Topolnikov A.S., Latypov B.M. On the optimization of the periodic mode of well production, which is operated by submergible electric pumps in Rosneft Oil Company (Russian). *OIJ*, 2021, pp. 92–96. DOI: 10.24887/0028-2448-2021-4-92-96.
9. Likhacheva E.A., Ostrovskiy V.G., Lykova N.A., Musinskiy A.N., Baidarov P.A. Oil submersible pumps reliability during cyclic operation. *PROneft. Professionally about Oil*, 2021, vol. 6 (1), pp. 54–58. (In Russ.) DOI: 10.51890/2587-7399-2021-6-1-54-58.
10. Kladiev S.N. Review and critical analysis of the current state and ways of developing the technological process of oil production by an electric drive in intermittent modes of operation of low- and medium-rate wells. *Bulletin of the Tomsk Polytechnic University. Geo Assets Engineering*, 2020, vol. 334, no. 8. pp. 220–231. (In Russ.) DOI: 10.18799/24131830/2023/8/4349.
11. Glazyrin A.S., Kladiev S.N., Afanasiev K.S., Timoshkin V.V., Slepnev I.G., Polishchuk V.I., Halasz S. Design of full order observer with real time monitoring of load torque for submersible induction motors. *Bulletin of the Tomsk Polytechnic University. Geo Assets Engineering*, 2018, vol. 329, no. 2. pp. 118–126. (In Russ.)
12. Kwon Y.A., Kim S.K. A high-performance strategy for sensorless induction motor drive using variable link voltage. *IEEE Trans Power Electron.* 2007, vol. 22, no. 1, pp. 329–332. DOI: 10.1109/TPEL.2006.887178.
13. Iudin R., Petrochenkov A., Krause B., Solodkiy E., Panchenko G. Electrical submersible pump complex model for sensorless parameters observing. *2021 IEEE 62nd International Scientific Conference on Power and Electrical Engineering of Riga Technical University*. Riga, Latvia, 2021. pp. 1–5. DOI: 10.1109/RTUCON53541.2021.9711743.
14. Rabbi S.F., Constantine M., Rahman M.A. A novel sensorless IPM motor drive for electric submersible pumps. *2017 IEEE International Electric Machines and Drives Conference*. Miami, FL, USA, 2017. pp. 1–8. DOI: 10.1109/IEMDC.2017.8002199.
15. Deng Y., Liang Z., Xi P., Zuo X. Improved speed sensorless vector control algorithm of induction motor based on long cable. *Journal of Electrical Engineering & Technology*, 2019, vol. 14, pp. 219–229. DOI: 10.1007/s42835-018-00023-7.
16. Kozlova L., Bolovin E., Payuk L. Angular velocity's neural network observer of the electric drive of TVR – IM type implemented in software environment LabVIEW. *IOP Conference Series: Materials Science and Engineering*. Tomsk, Russia, 2016. pp. 1–6. DOI: 10.1088/1757-899X/132/1/012005.
17. Shubin S.S., Yamaliev V.U., Glazyrin A.S., Bunkov D.S., Kladiev S.N., Rakov I.V., Bolovin E.V., Kovalev V.Z., Khamitov R.N. Estimation of submersible induction motor equivalent circuit parameters based on test data *Bulletin of the Tomsk Polytechnic University. Geo Assets Engineering*, 2021, vol. 332, no. 1, pp. 204–214. (In Russ.) DOI: 10.18799/24131830/2021/1/3013

18. Montoya O.D., De Angelo Cr.H., Bossio G. Parametric estimation in three-phase induction motors using torque data via the generalized normal distribution optimizer. *Results in Engineering*, 2024, vol. 23, pp. 1–8. DOI: 10.1016/j.rineng.2024.102446
19. Elkholy M.M., El-Hay E.A., El-Fergany A.A. Synergy of electrostatic discharge optimizer and experimental verification for parameters estimation of three phase induction motors. *Engineering Science and Technology, an International Journal*, 2022, vol. 31, pp. 1–10. DOI: 10.1016/j.jestch.2021.09.013
20. Udu L.S., Malceva O.P., Koyain N.V. *Design and research of automated electric drives: textbook. Part 8. Induction frequency-controlled electric drive*. Tomsk, TPU Publ., 2011. 648 p.
21. Indragandhi V., Subramaniaswamy V., Selvamathi R. *Electric motor drives and their applications with simulation practices*. USA, Cambridge, Academic Press, 2022. 507 p.
22. Afanasyev K.S. *Development of a state observer for an induction electric drive with increased parametric robustness*. Cand. Diss. Tomsk, 2015. 106 p.

Information about the authors

Alexander S. Glazyrin, Dr. Sc., Professor, National Research Tomsk Polytechnic University, 30, Lenin avenue, Tomsk, 634050, Russian Federation; Professor, Yugra State University, 16, Chekhov street, Khanty-Mansiysk, 628012, Russian Federation. asglazyrin@tpu.ru; <https://orcid.org/0000-0003-4138-5982>

Semen S. Popov, Postgraduate Student, National Research Tomsk Polytechnic University, 30, Lenin avenue, Tomsk, 634050, Russian Federation; Software Engineer, «NPF Mechatronica-Pro» LTD, 119e, Frunze avenue, Tomsk, 634513, Russian Federation. ssp14@tpu.ru; <https://orcid.org/0009-0004-4139-8032>

Evgeniy I. Popov, Assistant, Industrial University of Tyumen, 38, Volodarsky street, Tyumen, 625000, Russian Federation. popovei72@mail.ru

Vladimir A. Kopyrin, Cand. Sc., Associate Professor, Industrial University of Tyumen, 38, Volodarsky street, Tyumen, 625000, Russian Federation. kopyrinva@gmail.com; <https://orcid.org/0000-0002-7515-4018>

Rustam N. Khamitov, Dr. Sc., Professor, Industrial University of Tyumen, 38, Volodarsky street, Tyumen, 625000, Russian Federation; Professor, Omsk State Technical University, 11, Mira avenue, Omsk, 644050, Russian Federation. apple_27@mail.ru; <https://orcid.org/0000-0001-9876-5471>

Alexander A. Filipas, Cand. Sc, Associate Professor, National Research Tomsk Polytechnic University, 30, Lenin avenue, Tomsk, 634050, Russian Federation. filipas@tpu.ru; <https://orcid.org/0000-0002-5376-5416>

Vadim V. Timoshkin, Cand. Sc., Associate Professor, National Research Tomsk Polytechnic University, 30, Lenin avenue, Tomsk, 634050, Russian Federation. timoshkinvv@tpu.ru; <https://orcid.org/0000-0001-5116-5508>

Evgeniia A. Beliauskene, Senior Lecturer, National Research Tomsk Polytechnic University, 30, Lenin avenue, Tomsk, 634050, Russian Federation; eam@tpu.ru; <https://orcid.org/0000-0002-1638-4366>

Yulia O. Kulesh, Engineer, National Research Tomsk Polytechnic University, 30, Lenin avenue, Tomsk, 634050, Russian Federation; yok13@tpu.ru

Evgeniy V. Bolovin, Cand. Sc., Associate Professor, National Research Tomsk Polytechnic University, 30, Lenin avenue, Tomsk, 634050, Russian Federation; LLC «INT» of JSC «EleSy», 161A, Altaiskaya street, Tomsk, 634021, Russian Federation. orange@tpu.ru; <https://orcid.org/0000-0002-8483-8999>

Vladimir Z. Kovalev, Dr. Sc., Professor, Yugra State University, 16, Chekhov street, Khanty-Mansiysk, 628012, Russian Federation; Professor, National Research Tomsk Polytechnic University, 30, Lenin avenue, Tomsk, 634050, Russian Federation. vz_kovalev@mail.ru; <https://orcid.org/0000-0002-4512-6868>

Marina V. Deneko, Cand. Sc., Associate Professor, Moscow Technical University of Communications and Informatics, 8A, Aviamotornaya street, Moscow, 111024, Russian Federation. denekomarina585@gmail.com; <https://orcid.org/0000-0003-4162-375X>

Received: 26.07.2024

Revised: 12.08.2024

Accepted: 10.09.2024

УДК 504.06; 504.3.054
DOI: 10.18799/24131830/2024/9/4833
Шифр специальности ВАК: 03.02.08

Термины для описания атмосферных осадений веществ на поверхность

Н.И. Янченко✉

Иркутский национальный исследовательский технический университет, Россия, г. Иркутск

✉fduecn@bk.ru

Аннотация. *Актуальность* исследования связана с необходимостью оценки состояния окружающей среды на основе применения терминологии количественной химической характеристики подстилающей поверхности в результате осадений загрязняющих веществ в составе влажных и сухих выпадений из атмосферы. *Цель.* Данное исследование может быть источником информации о терминологии, применяемой для описания состояния подстилающей поверхности при осадении веществ из атмосферы, со ссылками на научно-техническую литературу. *Методы:* обзор научно-технической литературы и попытка выборки терминов, применяемых для количественной оценки экологического состояния подстилающей поверхности после поступления веществ в составе сухих и влажных выпадений из атмосферы, в зависимости от метода отбора проб. *Результаты и выводы.* Проведен анализ научно-технической литературы, и определены термины, применяемые к величине, которая имеет размерность масса/площадь*время для оценки экологического состояния снежного покрова, такие как «удельный запас (поверхностная плотность)», «плотность выпадения», «плотность атмосферного выпадения», «интенсивность выпадения загрязняющего вещества», «суточное выпадение химических элементов», «техногенная нагрузка», «пылевая нагрузка», «нагрузки загрязнения (элемента)», «массовая нагрузка», «газово-аэрозольная нагрузка», «модуль техногенного давления», «модуль поступления», «модуль атмосферных выпадений», «масса определяемого компонента, поступившего на единицу площади», «поток», полученные на основании отбора проб снежного покрова по высоте при снегохимической съемке. Также проведен анализ научно-технической литературы, и определены термины, применяемые к величине, которая имеет ту же размерность масса/площадь*время для оценки экологического состояния подстилающей поверхности при осадении веществ из атмосферы, таких как «плотность выпадения», «плотность атмосферного выпадения», «интенсивность выпадения загрязняющего вещества», «выпадения», «критическая нагрузка», «поток», полученных на основе сбора проб с помощью планшетов, кюветов, сборников.

Ключевые слова: снежный покров, атмосферные выпадения, нагрузка, интенсивность, плотность выпадения, поток

Для цитирования: Янченко Н.И. Термины для описания атмосферных осадений веществ на поверхность // Известия Томского политехнического университета. Инжиниринг георесурсов. – 2024. – Т. 335. – № 9. – С. 220–230. DOI: 10.18799/24131830/2024/9/4833

UDC 504.06; 504.3.054
DOI: 10.18799/24131830/2024/9/4833

Terms for describing atmospheric deposition of substances on surfaces

Natalia I. Ianchenko✉

Irkutsk National Research Technical University, Irkutsk, Russian Federation

✉fduecn@bk.ru

Abstract. Relevance. The need to assess the state of the environment based on the use of terminology for quantitative chemical characteristics of the underlying surface as a result of deposition of pollutants in the composition of wet and dry fallout from the atmosphere. **Aim.** This study can be a source of information about the terminology used to describe the state of the

underlying surface during the deposition of substances from the atmosphere, with links to scientific and technical literature. **Methods.** Review of some scientific and technical literature and an attempt to select terms used to quantify the ecological state of the underlying surface after the arrival of substances as part of dry and wet deposition from the atmosphere, depending on the sampling method. **Results and conclusions.** The author has carried out an analysis of the scientific and technical literature and defined the terms applied to a quantity that has the dimension mass/area*time for assessing the ecological state of the snow cover, such as specific reserve (surface density), deposition density, atmospheric deposition density, precipitation intensity pollutant, daily deposition of chemical elements, technogenic load, dust load, pollution load (element), mass load, gas-aerosol load, technogenic pressure module, input module, atmospheric fallout module, mass of the determined component received at unit area, flux obtained on the basis of sampling during snow chemical survey. An analysis of the scientific and technical literature was also carried out and the terms applied to a value with the same dimension mass/area*time were defined to assess the ecological state of the underlying surface during the deposition of substances from the atmosphere, such as "fallout density", "atmospheric fallout density", "pollutant fallout intensity", "aggravating substance", "precipitation", "critical load", "flow" obtained based on sample collection using plates, cuvettes, collections.

Keywords: snow cover, atmospheric precipitation, load, intensity, precipitation density, flux

For citation: Ianchenko N.I. Terms for describing atmospheric deposition of substances on surfaces. *Bulletin of the Tomsk Polytechnic University. Geo Assets Engineering*, 2024, vol. 335, no. 9, pp. 220–230. DOI: 10.18799/24131830/2024/9/4833

Введение

Известно, что «проблемы природно-техногенной и экологической безопасности – результат дестабилизации системы "социум–техносфера–природная среда"...», вызванной игнорированием требований, выдвинутых в концепции устойчивого развития» [1. С. 316], которая предполагает в том числе оценку экологического риска или прогнозирования на основе мониторинга состояния компонентов окружающей среды.

Мониторинг может включать количественное и качественное описание химического состояния подстилающей поверхности в результате поступления веществ из атмосферы в виде сухих и влажных атмосферных выпадений. Выпадения компонентов с атмосферными осадками позволяют оценить нагрузку на окружающую среду в целом, в том числе на подстилающую поверхность. Как указано в Конвенции 2004 года, «общее отложение – это сумма сухих (турбулентных движений газов и частиц к поверхности), влажных (попадающих через дождь, снег или град), а также содержащихся в тумане и воде облаков отложений» [2. С. 25]. Вещества, входящие в состав выпадений, при определённых условиях могут относиться к категории «загрязняющих» для человека, биоты или экосистемы.

П.Ф. Свистов пишет, «в этих процессах формирования окружающей воздушной среды заметная роль принадлежит атмосферным осадкам. Помимо увлажнения подстилающей поверхности, при выпадении осадков она подвергается в разной степени воздействию их химического и биологического состава» [3. С. 8].

Информативной подстилающей поверхностью может быть и снежный покров. П.Ф. Свистов пишет «формирование химического состава снежного покрова происходит в процессе образования и пе-

реноса снежинок с облаками, при выпадении из атмосферы, а также в результате поступления из подстилающей почвы» [3. С. 92].

Вещества в атмосфере могут быть водорастворимыми и неводорастворимыми газами, водорастворимыми или нерастворимыми аэрозолями, соответственно, первые будут в составе фильтрата снеговой воды, а нерастворимые твердые вещества входят в состав твердого осадка (пыль), который остается на фильтре после фильтрования снеговой воды пробы снежного покрова или после фильтрования влажных атмосферных выпадений (осадки дождя или снегопадов). В РД 52.04.186-89 в п. 5.1. Наблюдения за загрязнением снежного покрова на основании снегомерной съемки [4. С. 508] пишут про «осадок твердых частиц на фильтре» [4. С. 511] после фильтрования талой воды. В англоязычной литературе применяется термин «Total suspended solids (TSS)» [5, 6] (перевод Google – «Общее количество взвешенных частиц»), который описывает тот же твердый водонерастворимый осадок снежного покрова, оставшийся на фильтре после фильтрования или центрифугирования снеговой воды.

Для количественного описания результата поступления веществ из атмосферы на подстилающую поверхность в научно-технической литературе применяются такие термины, как: «плотность выпадения загрязняющих веществ», «нагрузка выпадения», «интенсивность выпадения», «критические нагрузки», «атмосферные потоки», «модуль атмосферных выпадений», «величина влажного выпадения веществ» и другие, при этом может указываться название вещества, элемента или иона, а также отнесение его к категории «загрязняющие вещества». Все перечисленные термины, которые являются и показателями наблюдений/мониторинга, имеют одну и ту же единицу измерения (размерность) – масса/единица площади*время или мас-

са/единица площади. Единица времени может отсутствовать, но авторы в тексте обычно делают уточнение о продолжительности периода наблюдений, об особенностях отбора проб, о времени отбора проб и т. д.

Рассматриваемые термины или показатели (масса вещества/единица площади*время) являются расчетным и могут быть получены на основании натурных измерений, например, при отборе проб снежного покрова по высоте при снегохимической (снегомерной) съемке, наблюдениях за атмосферными выпадениями с помощью различных планшетов/сборников/кювет с определенной экспозицией в течение заданного периода времени или разового случая дождя, снегопада.

Как указано в [4. С. 517], «конечной целью первичной обработки результатов измерений (при исследовании снежного покрова) является получение значений концентрации загрязняющих веществ в снеге, удельного запаса (поверхностной плотности) загрязняющих веществ на маршруте Q и средней интенсивности выпадений по исходным начальным данным для каждой пробы U », где Q имеет размерность мг/м^2 , U – $\text{мг/м}^2 \cdot \text{сут}$. При этом, как обращает внимание Н.А. Першина, «поступление веществ на подстилающую поверхность зависит как от концентрации, так и в еще большей степени от количества осадков» [7. С. 6].

Рассматриваемые термины, имеющие единицу измерения масса/площадь*время важны для мониторинга и тем, что могут применяться, например, для косвенной оценки качества воздуха. Так, в «Руководстве по контролю загрязнения атмосферы» в пункте 3.4.6 «Косвенные методы исследования уровня загрязнения атмосферы» указано, что «кроме наблюдений непосредственно за уровнем загрязнения атмосферы, используются также *косвенные методы*, к числу которых относится отбор проб атмосферных осадков, определение содержания вредных веществ в снеге, почве и растительности» [4. С. 31].

При многолетней оценке динамики качества воздуха по величине загрязнения снежного покрова целесообразно учитывать и погодные показатели зимних периодов, например, такие, как оттепели. Так, в [8] рассматриваются физико-химические изменения снежного покрова, происходящие в период таяния снега, и отмечено, что результаты химического анализа показали, что в период оттепели первые порции талых вод были ответственны за дренаж в грунт значительной части примесей [8]. Так как общеизвестно, что температуры зимних периодов, количество осадков разных лет или продолжительность залегания снежного покрова могут год от года между собой значительно различаться, и многочисленные сведения об этом приведены в

докладах Росгидромета. Например, в докладе за 2018 г. [9. С. 16–17] отмечено, что «в период с 1976 по 2018 г. на значительной части страны выявлена тенденция уменьшения продолжительности залегания снежного покрова: на большей части Европейской части Российской Федерации... В среднем для Российской Федерации число дней со снегом сокращается на 0,75 дня за 10 лет» [9. С. 16–17]. В связи с этим не исключено, что погодные изменения влияют на химический состав снежного покрова, на расчет оценки состояния подстилающей поверхности и, как следствие, на косвенную оценку качества воздуха. Так, исследователи [10] указывают, что для большинства регионов Китая снижение относительной влажности и охлаждающий эффект сильных экстремальных осадков и их синоптической системы способствуют пиковому или отрицательному характеру зависимости между экстремальными осадками и соответствующей среднесуточной температурой, что отражается на характеристиках влажных выпадений.

Влияние погодных условий показано при сравнении химического состава снежного покрова с химическим составом атмосферных осадков в работе [3]. Так, на метеостанции Воейкова (Северо-Западное УГМС) в 2010–2011 гг. рассчитанные выпадения на снежный покров составили $2,12 \text{ т/км}^2$ и были выше, чем рассчитанные по атмосферным осадкам $1,49 \text{ т/км}^2$ (за тот же период времени). Но «в холодный период 2018–2019 гг. сумма выпадений с осадками составила $1,05 \text{ т/км}^2$ и уже превышала примерно на 35 % суммарные выпадения, рассчитанные по результатам химического состава снежного покрова $0,82 \text{ т/км}^2$ » [3. С. 103]. Как пишут авторы «связано это, скорее всего, с неустойчивыми погодными условиями в зимний период 2018–2019 гг.: периодическими оттепелями, мокрым снегом и дождем, что в свою очередь вызвало снижение содержания большинства компонентов в снежном покрове вследствие миграции по жидкоподобным пленкам в почву» [3. С. 103].

Можно предположить, что погодные условия, а не только технологические факторы влияют на пока не объясненные «...значительные колебания *плотности атмосферных выпадений* (при исследовании снежного покрова, прим. автора) соединений фтора как в фоновом районе, так и на пробных площадках в зоне влияния выбросов» в 2014–2018 гг. [9. С. 185]. В связи с этим становится очевидной непростая задача определения приоритетного фактора, повлиявшего на значительные колебания плотности выпадений загрязняющего вещества в снежном покрове, и в связи с этим дальнейшая оценка качества воздуха.

Авторы [11] отмечают, что по мере накопления многолетних данных становится актуальной пробле-

ма интерпретации данных об уровне накопления загрязняющих веществ депонирующей средой и загрязнении атмосферного воздуха. Q. Dai, T. Dai при анализе данных учитывают многие факторы и пишут, что на межгодовые колебания загрязнителей воздуха оказывают влияние не только источники выбросов, но и метеорологические факторы [12]. Вероятно, для более достоверной оценки качества воздуха по величине плотности выпадения ЗВ за отдельные годы в многолетнем ряду наблюдений в конкретном районе исследования целесообразно в перспективе указывать основные погодные характеристики сравниваемых периодов наблюдений, например, такие, как температура, количество атмосферных осадков, продолжительность оттепелей или иные.

В данном исследовании сделана попытка рассмотрения терминов для количественного описания химического состояния подстилающей поверхности, в том числе и снежного покрова, в результате выпадения водорастворимых, нерастворимых веществ из атмосферы в составе сухих и влажных выпадений. Эта статья может быть источником справочной информации общего характера со ссылками на научно-техническую литературу. Предложен алгоритм статьи, включающий разделение терминологий в зависимости от способа отбора проб. В данной статье два метода отбора проб: отбор проб по высоте снежного покрова при снегохимической съемке и отбор проб сухих и влажных выпадений при ежемесячном сборе атмосферных осадков или в заданный период времени.

Задачи исследования: поиск и попытка первичной систематизации общепринятых терминов с единицей измерения масса/площадь*время для описания химического состояния подстилающей поверхности, в том числе снежного покрова.

Результаты исследования и их обсуждение

1. Термины, применяемые к величине, которая имеет размерность масса/площадь*время, для описания химического состояния снежного покрова, выполненного методом снегохимической съемки (снегового опробования)

- 1.1. Термин «удельный запас (поверхностная плотность)», «интенсивность выпадения», «плотность выпадения», «суточное выпадение химических элементов»

Авторы [13. С. 59] пишут: «картину пространственного распределения загрязняющих вещества в снежном покрове удобно характеризовать тремя картами: распределения концентрации загрязняющих веществ, мг/л; количества загрязняющих веществ, выпавшего за время от образования снежного покрова до момента максимума влагозапаса в снеге – *запаса (поверхностной плотности)*, т/км²; *интенсивности выпадения загрязняющих веществ*, кг/(км²*сут.)».

«*Запас (поверхностная плотность)*» ЗВ на маршруте Q (т/км²) рассчитывается по формуле [13. С. 59]:

$$Q = 10^{-2} * C * P,$$

где C – концентрация, мг/л; P – средний влагозапас на маршруте в г/см² [13. С. 59].

Исследователи В.Н. Василенко, И.М. Назаров, Ш.Д. Фридман также являются авторами раздела 5 части II Руководящего документа [4], и здесь они рекомендуют для описания количественных характеристик загрязнения снежного покрова такие термины, как «*удельный запас (поверхностная плотность) загрязняющих веществ на снегомерном маршруте*», «*интенсивность выпадения загрязняющего вещества*». Об этом указано во II части РД «Региональное загрязнение атмосферы» в пункте 5 «Наблюдения за загрязнением снежного покрова на основе снегомерной съемки» [4. С. 508], в пункте 5.3 «Обработка и представление результатов измерений» [4. С.5 17], в подпункте 5.3.1 «Исходные данные» (термин «поверхностная плотность») [4. С. 517] и в подпункте 5.3.2 «Расчетные формулы» [4. С. 519].

Так, в [15. С. 107] указано что, «*средняя плотность выпадений водорастворимых фторидов в снежном покрове обследованной территории г. Зима составляет 0,06 кг/км²*мес., ... Фоновое значение плотности выпадений водорастворимых фторидов в снежном покрове составило 0,05 кг/км²*мес.*».

Исследователи О.Н. Зубарева, Д.А. Прысов, И.В. Данилова, М.А. Пляшечник используют термин «*плотность выпадения*» и конкретизируют предмет исследования словами «ионов», «загрязняющих веществ», «атмосферных выпадений», «пыли» при описании мониторинга снежного покрова г. Красноярск [16]. В Государственном докладе в п. 6.3. Загрязнение снежного покрова токсикантами промышленного происхождения [14. С. 62] также указано, что «*средняя плотность сульфатов в снежном покрове обследованной территории составляет 2,65 кг/км²*мес. (0,9 Ф)*» [14. С. 62], «*плотности водонерастворимых форм соединений тяжелых металлов*» [14. С. 62], «*плотность содержания сульфат-ионов в снежном покрове... среднее значение плотностей сульфатов составило 40,90 кг/км²*мес*» [14. С. 62].

Авторы [17. С. 11] указывают на важность понятийного аппарата и терминологии при геохимическом изучении окружающей среды. Они пишут [17. С. 127], что «изучение форм нахождения в атмосферных выпадениях (рис. 30 [17. С. 125]) показывает, что аномалии в «фоновых» городах во многом обусловлены поступлением химических элементов в виде пыли. С нерастворимой частью выпадений здесь связывается 70–90 % аномальных

конденсаций. В фоновых условиях большая часть химических элементов находится в растворенной форме», в подписи к рис. 30 указан термин «плотность выпадения, $г/км^2$ » [17. С. 125], как в снеговой воде, так и в пыли.

- 1.2. Термин «техногенная нагрузка», «пылевая нагрузка», «массовая нагрузка», «модуль техногенного давления», «модуль поступления», «газово-аэрозольная нагрузка», «модуль атмосферных выпадений»

Термин «нагрузка» указан в [17]. В работе написано, что «в некоторых случаях изучается распределение так называемых показателей *техногенной нагрузки или модулей техногенного давления* – массовой доли или объемной концентрации загрязняющих веществ, поступающих в окружающую среду на единицу площади (длины) за единицу времени (например, $г/м^2 \cdot сут.$)» [17. С. 18].

Р.Ю. Пожитков, Д.В. Московченко, А.В. Соромотин, Е.В. Томилова также применяют термин «пылевая нагрузка». Они пишут, что «по сравнению с промышленно развитыми регионами, где приток элементов со снегом на участках техногенного воздействия увеличивается в десятки раз, на Заполярном месторождении и на территории пос. Тазовский суммарный *поток атмосферных загрязнителей* невелик, что связано с относительно небольшой *пылевой нагрузкой*» [18. С. 19].

А.В. Таловская из научной школы профессора Е.Г. Язикова во всех публикациях указывает термин «пылевая нагрузка» [19]. Научная школа профессора Н.С. Касимова также применяет термин «пылевая нагрузка» с единицей измерения ($кг/км^2 \cdot сут.$) [20].

Термин «loadings» (перевод Google – «нагрузка») применяется в [6. Р. 693]. Автор пишет, что «Ancillary data obtained from Environment and Climate Change Canada (ECCC) for this study include the snow water equivalent data needed to convert PAC and metals concentrations in snow (e.g., $\mu g L^{-1}$) to their environmental *loadings* in mass per unit area over a given time period (e.g., $\mu g/m^2$)» (перевод Google – «Вспомогательные данные, полученные Канадой по окружающей среде и изменению климата (ECCC) для этого исследования, включают данные об эквиваленте воды в снеге, необходимые для преобразования концентраций РАС и металлов в снеге (например, $мкг л^{-1}$) в их *нагрузку* на окружающую среду в массе на единицу площади за определенный период времени (например, $мкг/м^2$)»). Также «Total suspended solids (TSS) and particulate organic carbon (POC) areal *loadings* are summarized in Fig. 1 (top row) in milligrams per square metre (mg/m^2)» (перевод Google – «Общие площадные *нагрузки* взвешенных твердых частиц (TSS) и органического углерода в виде частиц (POC) суммированы на рис. 1

(верхний ряд) в миллиграммах на квадратный метр ($мг/м^2$)»). Термин «loading» ($\mu g/m^2$) – «нагрузка» указан также в работе [21].

В работе [22] указано, что «where ML is the mass load of the given pollutant per square meter of a snow deposit (mg/m^2)» (перевод Google – «массовая нагрузка данного загрязняющего вещества на квадратный метр снежной залежи ($мг/м^2$)»).

Авторы работы [23] применяют термин «Mass Loading» (перевод Google – «массовая нагрузка») при рассмотрении поступления пыли на снежный покров и указывают $г/м^2$ при описании случаев выпадения пыли в отдельные даты, например, «Mass loading of the ALM layers ranged greatly from 5.6 to 50.1 $г/м^2$ for WY15 and WY13, respectively ...» (перевод Google – «Массовая нагрузка слоев ALM значительно варьировалась от 5,6 до 50,1 $г/м^2$ для WY15 и WY13 соответственно...»)

Профессор В.Н. Макаров применяет уточняющий термин «газово-аэрозольная нагрузка» P_n , $мг/(м^2 \cdot сут.)$. Он пишет: «Газово-аэрозольная нагрузка в холодное время года (поступление загрязнителей в растворимой фазе снежного покрова из атмосферы) неравномерно распределяется на территории города» [24. С. 424].

Термин «модуль поступления» применительно к атмосферному выпадению веществ указан в работах М.И. Василевича с соавторами. Авторы пишут: «модулей поступлений на подстилающую поверхность...», «модули поступления суммы ПАУ», «модулей поступления нитрат-ионов» [25. С. 35]. Термин «модули/ей» атмосферных выпадений также указан в работе [26. С. 309].

- 1.3. Термин «масса определяемого компонента, поступившего на единицу площади»

Ю.Е. Сайет с соавторами [17. С. 83] указывает, что «по данным снегового опробования рассчитывается аналогичный показатель и для *нагрузки* загрязнения (элемента) на окружающую среду – *массы загрязнителя, выпадающей на единицу площади за единицу времени*. Для этого учитывается общая масса потока загрязнителей – среднесуточная пылевая нагрузка P_n (в $кг/км^2$) и концентрация элемента (в $мг/кг$) в снеговой пыли. На этом основании рассчитывается общая нагрузка, создаваемая поступлением химического элемента в окружающую среду $P_{общ} = C P_n \dots$ » [17. С. 83].

В исследовании [25. С. 35] указано, что «для более корректной интерпретации результатов эксперимента полученные данные пересчитывали в соответствующие значения массовой концентрации каждого компонента в снеге на единицу площади, используя следующую формулу ... где P – *масса определяемого компонента, поступившего на единицу площади поверхности земли за весь период сохранения снежного покрова, $г/м^2$, или $мг/м^2$* ».

На сайте Института географии и водной безопасности республики Казахстан [27] приведен краткий отчет о научно-исследовательской работе «Геоэкологический мониторинг депонирующих сред территории дельты реки Иле и государственного природного резервата «Иле-Балкаш» и указания формула расчета P с уточнением о том, что это « P – масса определяемого компонента, поступившего на единицу площади поверхности земли за весь период сохранения СП, г/м^2 или мг/м^2 ». Исследователи Т.В. Носкова, О.В. Ловцкая, Т.С. Папина с коллегами пишут, что «поток поступления изучаемых компонентов в течение зимнего периода из атмосферы на подстилающую поверхность рассчитывали с помощью формулы....где P – масса определяемого компонента, поступившего на единицу площади земной поверхности за период залегания снежного покрова, мг/дм^2 » [28. С. 452].

В коллективной монографии И.С. Каманиной указано, что «содержание тяжелых металлов в снеговой воде определялось в единицах массовых концентраций (мкг/дм^3). Для более корректной интерпретации полученные результаты пересчитывались в соответствующие значения *уровней поступления* веществ на поверхность в мг/м^2 по формуле ... «где P – масса определяемого компонента, поступившего на единицу площади поверхности земли за весь период сохранения снежного покрова мг/м^2 » [29. С. 59]. Авторы пишут о нерастворимых веществах в снежном покрове (в «твердой фазе снежного покрова» [29. С. 77]) и применяют слово/термин «нагрузка», «общая нагрузка загрязнения», «пылевая нагрузка, $\text{кг/(\text{км}^2 \cdot \text{сут.})}$ » [29. С. 59].

1.4. Термин «поток»

Xiaoping Wang с соавторами [30] пишет, что было собрано 15 проб поверхностного снега и 3 пробы из снежных ям для исследования концентраций и потоков ПФАС (перфторалкильные вещества) ... благодаря как высокой концентрации ПФАС в снегу, так и значительному накоплению водного эквивалента были получены высокие *потоки осадения* (перевод Google – «*deposition flux*»): 1,8, 2,9 и 4,0 $\text{мкг/м}^2 \cdot \text{год}$ [30. Р. 294, 300].

Shi G., Ma H. и другие [31. Р. 1093] применяют слово «*поток*» и указывают, что «Ion fluxes in the three snow pits can be determined by multiplying the concentrations by the snow accumulation rate» (перевод Google – «*потоки ионов в трех снежных ямах можно определить, умножив концентрации на скорость накопления снега*»). Warren R.L. Cairns с соавторами также применяют слово «*поток*» в сообщении о депонировании ртути в снежном покрове и пишут «The daily collection of snow accumulation at Dome C station and from this an estimation of the depositional fluxes of mercury» (перевод Google – «Ежедневный сбор накоплений снега на станции

Купол С и на основе этого оценка *потоков* депонирования ртути») [32].

Слово «*поток*» применяют при описании результатов исследования химического состава снежного покрова в работах [17. С. 83; 18. С. 19; 28. С. 452].

2. Термины, применяемые к величине, которая имеет размерность масса/площадь*время для описания химического состояния подстилающей поверхности, выполненного с помощью планшетов/кувет/сборников

2.1. Термин «плотность атмосферного выпадения», «интенсивность выпадения», «выпадения» для описания загрязнения подстилающей поверхности при выпадении атмосферных выпадений

Определение «*плотность выпадения*» указано в РД 52.18.717-2009 «Методика расчета рассеяния загрязняющих веществ в атмосфере при аварийных выбросах» [33. С. 5]. Это «количество ЗВ, накопившееся на единице площади подстилающей поверхности в течение определенного периода времени»; указано, что *плотность выпадения* обусловлена сухим или влажным выведением ЗВ из атмосферы [33. С. 19, 20], в том числе и со снегом [33. С. 28, 101]. В документе РД 52.18.826-2015 «Наставления гидрометеорологическим станциям и постам. Выпуск 12. Наблюдения за радиоактивным загрязнением природной среды» указаны устройства – планшеты для сбора загрязняющих веществ, которые имеют площадь $0,3 \text{ м}^2$, время их экспозиции устанавливается в зависимости от требований исследования [34, С. 9, 11, 21, 90], собранными средами могут быть любые атмосферные выпадения, в том числе и осадки снега.

Термин «*плотность атмосферных выпадений*» указывается в Государственном докладе «О состоянии и об охране окружающей среды Российской Федерации в 2018 году» [9. С. 185], где написано, что «в 2018 г. были продолжены наблюдения за атмосферными выпадениями фтористых соединений в городах Братск, Иркутск, Шелехов и п. Листвянка. Среднегодовое значение *плотности выпадений* фторидов ... зарегистрированное в районе п. Листвянка, принято за фоновое» [9. С. 185]. Среднегодовое значение определяется на основании специальных наблюдений, которые проводятся в течение каждого месяца. На этой же странице указано, что «в г. Братске и его окрестностях в 2018 г. продолжались наблюдения за загрязнением снежного покрова соединениями фтора. За период 2014–2018 гг. отмечались значительные колебания *плотности атмосферных выпадений* соединений фтора как в фоновом районе, так и на пробных площадках в зоне влияния выбросов» [9. С. 185]. Вероятно, в первом случае метод наблюдения основан на анализе отдельных месячных проб, в том числе и отобранных в снежный период, во

втором метод отбора – снегосъемка перед активным снеготаянием.

В [15. С. 37] указано, что «в 2022 г. в Иркутской области ... продолжены наблюдения за атмосферными выпадениями соединений фтора в городах Братск, Иркутск, Шелехов и п. Листвянка. Среднегодовое значение *плотностей выпадений* фторидов ($0,87 \text{ кг/км}^2 \cdot \text{месяц}$)». Ранее этот термин указан в п. 1.1. данной публикации. Термин один и тот же, единицы измерения одни и те же, отнесенные к одному временному периоду, к одному месяцу. Но численные значения плотности атмосферных выпадений, полученные на основании наблюдений за АО в течение 1 месяца, отличаются от значений плотности выпадения, полученных на основании снегомерной съемки и пересчитанные на 1 месяц. Плотности АО за зимний период и по результатам месячных наблюдений различаются и приведены в [3. С. 103]. Снегосъемка делается перед активным снеготаянием, если снежный покров сохранялся 4 месяца перед отбором пробы, например, с 1 ноября по 1 марта (период от образования устойчивого СП до даты отбора) и полученная величина «плотность выпадения» делится на 4. Единица измерения и название величины «плотность АО $\text{кг/км}^2 \cdot \text{месяц}$ » та же, что и полученная в снежный период, но в одном случае метод отбора проб осадков снега с помощью кюветы/планшета/сборника в течение месяца, а в другом – отбор проб СП по высоте перед активным снеготаянием и, как следствие, численные значения могут различаться.

В сборнике «Ежегодные данные по химическому составу и кислотности атмосферных осадков за 2016–2020 гг.» указывают термины «*P – величина влажного выпадения, $\text{г/м}^2 \cdot \text{год}$ ($\text{т/км}^2 \cdot \text{год}$)*» [7. С. 6], «*интенсивность суммарных выпадений*» [7. С. 17], «*интенсивность потоков*» [7. С. 16] основной термин «выпадения/ий» встречается в тексте 74 раза. «Отбор проб атмосферных осадков на всех станциях проводится с использованием одинаковых устройств (пробоотборник-емкость) и по единой методике в соответствии с РД 52.04.878-2019 [7. С. 5].

В Докладе по обзору фоновому состоянию [35. С. 3] указано название параграфа 1.5. «*Выпадения серы и азота в результате трансграничного переноса загрязняющих воздух веществ*», название таблицы 1.4.1. «*Сравнение суммарных выпадений серы и азота с осадками на станциях ЕАНЕТ в 2008–2017 г. и критических нагрузок, $\dots \text{г/м}^2 \cdot \text{год}$* ». В тексте отмечено, что сезонные изменения выпадений веществ определяются в основном годовым ходом осадков. «По результатам обработки годовых массивов, полученных данных оценены реальные величины атмосферных выпадений (нагрузок) серы и азота» [35. С. 45]. Слово «выпадения/ий» используется в обзоре примерно 65 раз [35].

В докладе «О состоянии и об охране окружающей среды Российской Федерации в 2018 году» [9] применяют термин «*выпадения*», с указанием конкретного тяжелого металла, хлорорганических пестицидов, ионов серы и азота. Так указано, что «в 2017–2018 гг. влажные выпадения кадмия на территории Кавказского БЗ составили менее $0,1 \text{ мг/м}^2$ » [9. С. 38], «влажные выпадения» с единицей измерения мкг/м^2 или мг/м^2 . На рис. 3.12 указана «Динамика выпадений суммарного азота... из атмосферы с осадками на станциях ЕМЕП ($\text{г N/м}^2 \cdot \text{год}$)». [9. С. 41]. В табл. 3.4 [9. С. 41] проводится сравнение «Суммарные выпадения и критические нагрузки для серы, $\text{г S/м}^2 \cdot \text{год}$ » [9. С. 41].

В обзоре «Ежегодные данные по химическому составу и кислотности атмосферных осадков за 2016–2020 гг.» [7] указано, что «*выпадения* загрязняющих веществ с атмосферными осадками рассчитывались на основе средневзвешенных месячных концентраций и количества выпавших осадков. ... величина влажных выпадений находится в прямой зависимости от суммы осадков и концентрации компонентов» [7. С. 15], единицы измерения $\text{т/км}^2 \cdot \text{год}$. Слово «выпадения/ий» применяется 84 раза.

2.2. Термин «критическая нагрузка»

Термин «Критические нагрузки» принят в Руководстве «Critical loads for eutrophication and acidification for European terrestrial ecosystems» [2]. Определение критической нагрузки таково: «Количественная оценка экспозиции одному или нескольким загрязнителям, ниже которой, согласно нынешнему состоянию знаний, не возникает значительных вредных последствий для определенных чувствительных элементов окружающей среды. ... Критические нагрузки были определены для нескольких загрязнителей и последствий их отложения», единицы измерения: $\text{масса/гектар} \cdot \text{год}$ ($\text{г} \cdot \text{га}^{-1} \cdot \text{год}^{-1}$) [2. С. 125].

Термин «критические нагрузки» указан для описания результатов наблюдений за химическим составом атмосферных осадков. Так, в «Обзоре фоновому состоянию окружающей природной среды на территории стран СНГ за 2017 г.» [35] словосочетание «*критические/их нагрузки/ок*» указано 17 раз. Также применялся и термин «поток», например, «... уровни потоков серы и азота с осадками (без сухих выпадений) в Прибайкалье все еще ниже значений критических нагрузок» [35. С. 43].

2.3. Термин «поток»

А.А. Виноградова, Е.И. Котова в статье [36] «применяют термин «плотность потоков» и «годовые потоки» с единицей измерения $\text{кг/км}^2 \cdot \text{год}$. Авторы [37] применяют слово «поток», например, «Cd Flux in Dry Deposition» (перевод Google – «поток кадмия в сухом осаждении»). Указано, что «потоки атмосферных осадений Cd вокруг пла-

вильного завода Гуйси летом 2020 г. колебались в пределах $0,31\text{--}2,27\text{ мг}\cdot\text{м}^{-2}$. Авторы [38] пишут об исследованиях, также применяя слово/термин «поток», указано об использовании системы моделирования отложений для расчета *потоков* (fluxes) сухих, влажных и общих (сухих + влажных) *осаждений* 27 элементов в виде твердых частиц.

Применяется термин «*поток*» в работе [9. С. 40], а именно «рассчитанные по средневзвешенным концентрациям и месячным суммам выпавших осадков величины влажных выпадений ... составили $\text{г}/\text{м}^2$ в год. ...*потоки* влажных выпадений серы и азота в зимний период существенно ниже, чем в летний».

Заключение

Проведен анализ научно-технической литературы и определены термины, применяемые к величине, которая имеет размерность масса/площадь*время, для описания химического состояния снежного покрова «удельный запас (поверхностная плотность)», «плотность выпадения», «плотность атмосферного выпадения», «интенсив-

ность выпадения ЗВ», «суточное выпадение химических элементов», «техногенная нагрузка», «пылевая нагрузка», «нагрузки загрязнения (элемента)», «массовая нагрузка», «газово-аэрозольная нагрузка», «модуль техногенного давления», «модуль поступления», «модуль атмосферных выпадений», «масса определяемого компонента, поступившего на единицу площади», «поток»; применяемые к величине, которая имеет ту же размерность масса/площадь*время, для описания химического состояния подстилающей поверхности при осаждении веществ из атмосферы с влажными и сухими выпадениями: «плотность выпадения», «плотность атмосферного выпадения», «интенсивность выпадения», «выпадения», «критическая нагрузка», «поток», полученной на основе сбора проб с помощью планшетов, кюветов, сборников.

Установлено, что для описания химического состояния снежного покрова и иной подстилающей поверхности применяется как одинаковые, так и разные термины, имеющие одну и ту же размерность (масса/площадь*время).

СПИСОК ЛИТЕРАТУРЫ

1. Бычков И.В., Фереферов Е.С. Цифровые технологии мониторинга и прогнозирования экологической обстановки в Сибири // Вестник Российской академии наук. – 2022. – Т. 92. – С. 315–323.
2. Critical loads for eutrophication and acidification for European terrestrial ecosystems. Final report. URL: https://www.umweltbundesamt.de/sites/default/files/medien/5750/publikationen/2021-07-12_doku_03-2021-critical_load.pdf (дата обращения: 01.10.2023).
3. Свистов П.Ф., Першина Н.А., Павлова М.Т. Атлас диаграмм химического состава атмосферных осадков (применение). – М.: Изд-во «Перо», 2023. – 140 с.
4. РД 52.04.186-89. Руководство по контролю загрязнения атмосферы. – М.: Госкомгидромет; Министерство здравоохранения СССР, 1991. – 693 с.
5. Estimating pollution loads in snow removed from a port facility: snow pile sampling strategies / A. Vijayan, H. Österlund, J. Marsalek, M. Viklander // Water, Air, & Soil Pollution. – 2021. – Vol. 232. – № 75. DOI: <https://doi.org/10.1007/s11270-021-05002-9>.
6. McNaughton C.S., Vandenberg J., Thiede P. Reanalysis of aerial deposition of metals and polycyclic aromatic compounds to snow in the Athabasca Oil Sands Region of Alberta Canada // Science of The Total Environment. – 2019. – Vol. 682. – P. 692–708. DOI: <https://doi.org/10.1016/j.scitotenv.2019.05.097>
7. Ежегодные данные по химическому составу и кислотности атмосферных осадков за 2016–2020 гг. (обзор данных) / Н.А. Першина, М.Т. Павлова, А.И. Полищук, Е.С. Семенец. – СПб: Изд-во ФГБУ «ГГО» Росгидромета, 2021. – 114 с.
8. Progressing pollutant elution from snowpack and evolution of its physicochemical properties during melting period – a case study from the Sudetes, Poland / D. Kępski, M. Błaś, M. Sobik, Ż. Polkowska, K. Grudzińska // Water, Air, & Soil Pollution. – 2016. – Vol. 227. – P. 1–20. DOI: <https://doi.org/10.1007/s11270-016-2797-z>.
9. Государственный доклад «О состоянии и об охране окружающей среды Российской Федерации в 2018 году». – М.: Изд-во Минприроды России; НПП «Кадастр», 2019. – 844 с.
10. Temperature dependence of extreme precipitation over mainland China / G. Xichao, Z. Yang, Q. Zhu, M. Guo, X. Zhi, G. Kai // Journal of Hydrology. – 2020. – Vol. 583. DOI: <https://doi.org/10.1016/j.jhydrol.2020.124595>.
11. Integrated evaluation of aerogenic pollution by air-transported heavy metals (Pb, Cd, Ni, Zn, Mn and Cu) in the analysis of the main deposit media / E. Baltrėnaitė, P. Baltrėnas, A. Lietuvninkas, V. Šerevičienė, E. Zuokaitė // Environmental Science and Pollution Research. – 2014. – № 21. – P. 299–313. DOI: <https://doi.org/10.1007/s11356-013-2046-6>.
12. Quantifying the impacts of emissions and meteorology on the interannual variations of air pollutants in major Chinese cities from 2015 to 2021 / Q. Dai, T. Dai, L. Hou, L. Li, X. Bi, Y. Zhang, Y. Feng // Science China Earth Sciences. – 2023. – № 66. – P. 1725–1737. DOI: <https://doi.org/10.1007/s11430-022-1128-1>.
13. Василенко В.Н., Назаров И.М., Фридман Ш.Д. Мониторинг загрязнения снежного покрова. – Л.: Изд-во «Гидрометеиздат», 1985. – 183 с.
14. Государственный доклад «О состоянии и об охране окружающей среды Иркутской области в 2022 году». – Иркутск: ООО «Максима», 2023. – 285 с.
15. Ежегодник «Загрязнение почв Российской Федерации токсикантами промышленного происхождения в 2022 году». – Обнинск: ФГБУ НПО «Тайфун», 2023. – 139 с.

16. Мониторинг загрязнения снежного покрова селитебной территории города Красноярска / О.Н. Зубарева, Д.А. Прысов, И.В. Данилова, М.А. Пляшечник // Снежный покров, атмосферные осадки, аэрозоли: Материалы Пятой Байкальской Международной научной конференции. – Иркутск: ООО «Репроцентр А1», 2023. – С. 88–93.
17. Геохимия окружающей среды / Ю.Е. Сает, Б.А. Ревич, Е.П. Янин, Р.С. Смирнова, И.Л. Башаркевич, Т.Л. Онищенко, Л.Н. Павлова, Н.Я. Трефилова, А.И., Ачкасов С.Ш. Саркисян. – М.: Недра, 1990. – 335 с.
18. Оценка загрязнения снежного покрова заполярного месторождения / Р.Ю. Пожитков, Д.В. Московченко, А.В. Соромотин, Е.В. Томилова // Защита окружающей среды в нефтегазовом комплексе // Защита окружающей среды в нефтегазовом комплексе. – 2019. – № 5. – С. 15–21.
19. Адильбаева Т.Е., Таловская А.В., Язиков Е.Г. Применение статистических методов анализа эколого-геохимических измерений содержания элементов в снеговом покрове в районе расположения теплоэлектростанции (г. Караганда, республика Казахстан) // Снежный покров, атмосферные осадки, аэрозоли: Материалы Пятой Байкальской Международной научной конференции. – Иркутск: ООО «Репроцентр А1», 2023. – С. 140–144.
20. Геохимия снежного покрова в Восточном округе Москвы / Н.С. Касимов, Н.Е. Кошелева, Д.В. Власов, Е.В. Терская // Вестник Московского университета. Серия 5: География. – 2012. – № 4. – С. 14–24.
21. Long-term spatial and temporal trends, and source apportionment of polycyclic aromatic compounds in the Athabasca Oil Sands Region / L. Chibwe, D.C.G. Muir, Y. Gopalapillai, D. Shang, J.L. Kirk, C.A. Manzano, B. Atkinson, X. Wang, C. Teixeira // Environmental Pollution. – 2021. – Vol. 268. URL: <https://doi.org/10.1016/j.envpol.2020.115351>.
22. Occurrence of tire and road wear particles in urban and peri-urban snowbanks, and their potential environmental implications / E.S. Rødland, O.C. Lind, M.J. Reid, L.S. Heier, E.D. Okoffo, C. Rauert, K.V. Thomas, S. Meland // Science of The Total Environment. – 2022. – Vol. 824. DOI: <https://doi.org/10.1016/j.scitotenv.2022.153785>.
23. Dust deposited on snow cover in the San Juan Mountains, Colorado, 2011–2016: compositional variability bearing on snow-melt effects / R.L. Reynolds, H.L. Goldstein, B.M. Moskowitz, R.F. Kokaly, S.M. Munson, P. Solheid, G.N. Breit, C.R. Lawrence, J. Derry // Journal of Geophysical Research: Atmospheres. – 2020. – Vol. 125. – № 7. DOI: <https://doi.org/10.1029/2019JD032210>.
24. Макаров В.Н., Торговкин Н.В. Эколого-геохимическая оценка снежного покрова Якутска // Лёд и Снег. – 2021. – Т. 61. – № 3. – С. 420–430. DOI: <https://doi.org/10.31857/S2076673421030098>.
25. Мониторинг аэротехногенного воздействия Сыктывкарского лесопромышленного комплекса / М.И. Василевич, Б.М. Кондратёнок, Д.П. Очеретенко, Р.С. Василевич, Д.Н. Габов, Е.Д. Лодыгин // Известия Томского политехнического университета. Инжиниринг георесурсов. – 2021. – Т. 332. – № 10. – С. 33–44. DOI: <https://doi.org/10.18799/24131830/2021/10/3395>.
26. Минакова Е.А., Шлычков А.П. Выпадения биогенных веществ с атмосферными осадками в бассейне Средней и Нижней Волги // Проблемы региональной экологии. – 2018. – № 6. – С. 92–97.
27. Геоэкологический мониторинг депонирующих сред территории дельты реки Иле и государственного природного резервата / А.С. Мадиеков, Н.А. Амиргалиев, А. Мұсақұлқызы, Л.Т. Исмуханова, Р.А. Кулбекова, А.Ө. Жәди, Б.М. Султанбекова, К.М. Болатов, А.Б. Кайранбаева, С.Т. Манапов. URL: https://ingeo.kz/?page_id=9391 (дата обращения: 01.10.2023).
28. Распределение органических веществ в снежном покрове города Барнаул / Т.В. Носкова, О.В. Ловцкая, Т.С. Папина, М.С. Панина // Социально-экологические технологии. – 2020. – Т. 10. – № 4. – С. 447–458. DOI: <https://doi.org/10.31862/2500-2961-2020-10-4-447-458>.
29. Комплексная оценка экологического состояния наукограда Дубна / И.З. Каманина, С.П. Каплина, О.А. Макаров, Н.А. Кликодуева. – Дубна: ОИЯИ, 2019. – 168 с.
30. Perfluorinated alkyl substances in snow as an atmospheric tracer for tracking the interactions between westerly winds and the Indian Monsoon over western China / X. Wang, M. Chen, P. Gong, C. Wang // Environment International. – 2019. – Vol. 124. – P. 294–301. DOI: <https://doi.org/10.1016/j.envint.2018.12.057>.
31. Brief communication: Spatial and temporal variations in surface snow chemistry along a traverse from coastal East Antarctica to the ice sheet summit (Dome A) / G. Shi, H. Ma, Z. Hu, Z. Chen, C. An, S. Jiang, Y. Li, T. Ma, J. Yu, D. Wang, S. Lu, B. Sun, M.G. Hastings // The Cryosphere. – 2021. – Vol. 15. – № 2. – P. 1087–1095. DOI: <https://doi.org/10.5194/tc-15-1087-2021>.
32. Show more mercury in precipitated and surface snow at Dome C and a first estimate of mercury depositional fluxes during the Austral summer on the high Antarctic plateau / R.L.W. Cairns, C. Turetta, N. Maffezzoli, O. Magand, B.F. Araujo, H. Angot, D. Segato, P. Cristofanelli, F. Sprovieri, C. Scarchilli, P. Grigioni, V. Ciardini, C. Barbante, A. Dommergue, A. Spolaor // Atmospheric Environment. – 2021. – Vol. 262. DOI: <https://doi.org/10.1016/j.atmosenv.2021.118634>.
33. РД 52.18.717-2009. Методика расчета рассеяния загрязняющих веществ в атмосфере при аварийных выбросах. – М.: Изд-во Госкомгидромет; Изд-во Министерства природных ресурсов и экологии Российской Федерации, 2012. – 276 с.
34. РД 52.18.826-2015. Наставления гидрометеорологическим станциям и постом. Вып. 12. Наблюдения за радиоактивным загрязнением природной среды. Министерство природных ресурсов и экологии РФ. Федеральная служба по гидрометеорологии и мониторингу природной среды (Росгидромет). Утвержден заместителем руководителя Росгидромета 23.06.2015
35. Обзор фонового состояния окружающей природной среды на территории стран СНГ за 2017 г. / под ред. Г.М. Черногаевой. – М.: Институт глобального климата и экологии имени академика Ю.А. Израэля, 2018. – 99 с.
36. Виноградова А.А., Котова Е.И. Оценка потоков тяжелых металлов из атмосферы на поверхность Баренцева моря // Труды Ферсмановской научной сессии ГИ КНЦ РАН. – 2019. – № 16. – С. 63–67. DOI: <https://doi.org/10.31241/FNS.2019.16.013>.
37. Atmospheric deposition of cadmium around a large copper smelter: characteristics and correlations with meteorological factors / Y. Li, Y. Long, H. Yang, Z. Huang, G. Huang // Water, Air, & Soil Pollution. – 2023. – Vol. 234. DOI: <https://doi.org/10.1007/s11270-023-06206-x>.
38. Atmospheric deposition mapping of particulate elements in the Canadian Athabasca oil sands region / A.A. Mamun, L. Zhang, F. Yang, I. Cheng, X. Qiu // Environmental Pollution. – 2023. – Vol. 331. DOI: <https://doi.org/10.1016/j.envpol.2023.121868>.

Информация об авторе

Наталья Ивановна Янченко, доктор технических наук, ведущий специалист Института высоких технологий Иркутского национального исследовательского технического университета, Россия, 664074, г. Иркутск, ул. Лермонтова, 83; fduecn@bk.ru

Поступила в редакцию: 08.11.2023

Поступила после рецензирования: 26.01.2024

Принята к публикации: 09.09.2024

REFERENCES

1. Bychkov I.V., Fereferov E.S. Digital technologies for monitoring and forecasting the environmental situation in Siberia. *Bulletin of the Russian Academy of Sciences*, 2022, vol. 92, pp. 315–323. (In Russ.)
2. *Critical loads for eutrophication and acidification for European terrestrial ecosystems*. Final report. Available at: https://www.umweltbundesamt.de/sites/default/files/medien/5750/publikationen/2021-07-12_doku_03-2021-critical_load.pdf (accessed 1 October 2023).
3. Svistov P.F., Pershina N.A., Pavlova M.T. *Atlas of diagrams of the chemical composition of atmospheric precipitation (application)*. Moscow, Pero Publ., 2023. 140 p. (In Russ.)
4. RD 52.04.186-89. *Air Pollution Control Guide*. Moscow, Roshydromet Publ., 1991. 693 p. (In Russ.)
5. Vijayan A., Österlund H., Marsalek J., Viklander M. Estimating pollution loads in snow removed from a port facility: snow pile sampling strategies. *Water, Air, & Soil Pollution*, 2021, vol. 232, no 75. DOI: <https://doi.org/10.1007/s11270-021-05002-9>.
6. McNaughton C.S., Vandenberg J., Thiede P. Reanalysis of aerial deposition of metals and polycyclic aromatic compounds to snow in the Athabasca Oil Sands Region of Alberta Canada. *Science of The Total Environment*, 2019, vol. 682, pp. 692–708. DOI: <https://doi.org/10.1016/j.scitotenv.2019.05.097>
7. Pershina N.A., Pavlova M.T., Polishchuk A.I., Semenets E.S. *Annual data on the chemical composition and acidity of atmospheric precipitation for 2016–2020 (data review)*. Saint Petersburg, Roshydromet «GGO» Publ., 2021. 114 p. (In Russ.)
8. Kępski D., Błaś M., Sobik M., Polkowska Ż., Grudzińska K. Progressing pollutant elution from snowpack and evolution of its physicochemical properties during melting period – a case study from the Sudetes, Poland. *Water, Air, & Soil Pollution*, 2016, vol. 227, pp. 1–20. DOI: <https://doi.org/10.1007/s11270-016-2797-z>.
9. *State report «On the state and protection of the environment of the Russian Federation in 2018»*. Moscow, Ministry of Natural Resources and Environment of the Russian Federation Publ.; NPP «Kadastr» Publ., 2019. 844 p. (In Russ.)
10. Xichao G., Yang Z., Zhu Q., Guo M., Zhi X., Kai G. Temperature dependence of extreme precipitation over mainland China. *Journal of Hydrology*, 2020, vol. 583. DOI: <https://doi.org/10.1016/j.jhydrol.2020.124595>.
11. Baltėnaitė E., Baltėnas P., Lietuvninkas A., Šerevičienė V., Zuokaitė E. Integrated evaluation of aerogenic pollution by air-transported heavy metals (Pb, Cd, Ni, Zn, Mn and Cu) in the analysis of the main deposit media. *Environmental Science and Pollution Research*, 2014, no. 21, pp. 299–313. DOI: <https://doi.org/10.1007/s11356-013-2046-6>.
12. Dai Q., Dai T., Hou L., Li L., Bi X., Zhang Y., Feng Y. Quantifying the impacts of emissions and meteorology on the interannual variations of air pollutants in major Chinese cities from 2015 to 2021. *Science China Earth Sciences*, 2023, no. 66, pp. 1725–1737. DOI: <https://doi.org/10.1007/s11430-022-1128-1>.
13. Vasilenko V.N., Nazarov I.M., Fridman Sh.D. *Monitoring of snow cover pollution*. Leningrad, Gidrometeoizdat Publ., 1985. 183 p. (In Russ.)
14. *State report «On the state and protection of the environment of the Irkutsk region in 2022»*. Irkutsk, LLC «Maxima» Publ., 2023. 285 p. (In Russ.)
15. *Yearbook «Soil contamination of the Russian Federation with toxicants of industrial origin in 2022»*. Obninsk, FSBI NPO «Typhoon» Publ., 2023. 139 p. (In Russ.)
16. Zubareva O.N., Prysov D.A., Danilova I.V., Plyashechnik M.A. Monitoring of pollution of the snow cover in the residential area of krasnoyarsk town. *Snow cover, precipitation, aerosols. Proceedings of the Fifth Baikal International Scientific Conference*. Irkutsk, LLC «Reprocentre A1», 2023. pp. 88–93. (In Russ.)
17. Achkasov A.I., Basharkevich I.L., Onishchenko T.L., Pavlova L.N., Revich B.A., Saet Yu.E., Sarkisyan S.Sh., Smirnova R.S., Trefilova N.Ya., Yanin E.P. *Environmental Geochemistry*. Moscow, Nedra Publ., 1990. 335 p. (In Russ.)
18. Pozhitkov R.Y., Moskovchenko D.V., Soromotin A.V., Tomilova E.V. Assessment of pollution of the snow cover of a polar field. *Environmental protection in the oil and gas complex*, 2019, no. 5, pp. 15–21. (In Russ.)
19. Adilbaeva T.E., Talovskaya A.V., Yazikov E.G. Application of statistical methods for analyzing ecological and geochemical measurements of the content of elements in the snow cover in the area where the thermal power plant is located (Karaganda, Republic of Kazakhstan). *Snow cover, precipitation, aerosols. Proceedings of the Fifth Baikal International Scientific Conference*. Irkutsk, LLC «Reprocentre A1», 2023. pp. 140–144. (In Russ.)
20. Kasimov N.S., Kosheleva N.E., Vlasov D.V., Terskaya E.V. Geochemistry of snow cover in the Eastern District of Moscow. *Vestnik Moskovskogo universiteta. Seriya 5, Geografiya*, 2012, no. 4, pp. 14–24. (In Russ.)
21. Chibwe L., Muir D.C.G., Gopalapillai Y., Shang D., Kirk J.L., Manzano C.A., Atkinson B., Wang X., Teixeira C. Long-term spatial and temporal trends, and source apportionment of polycyclic aromatic compounds in the Athabasca Oil Sands Region. *Environmental Pollution*, 2021, vol. 268. DOI: <https://doi.org/10.1016/j.envpol.2020.115351>.
22. Røddland E.S., Lind O.C., Reid M.J., Heier L.S., Okoffo E.D., Raurert C., Thomas K.V., Meland S. Occurrence of tire and road wear particles in urban and peri-urban snowbanks, and their potential environmental implications. *Science of The Total Environment*, 2022, vol. 824. DOI: <https://doi.org/10.1016/j.scitotenv.2022.153785>

23. Reynolds R.L., Goldstein H.L., Moskowit B.M., Kokaly R.F., Munson S.M., Solheid P., Breit G.N., Lawrence C.R., Derry J. Dust deposited on snow cover in the San Juan Mountains, Colorado, 2011–2016: compositional variability bearing on snow-melt effects. *Journal of Geophysical Research: Atmospheres*, 2020, vol. 125, no. 7. DOI: <https://doi.org/10.1029/2019JD032210>.
24. Makarov V.N., Torgovkin N.V. Ecological and geochemical characteristics of the snow cover in the Yakutsk city (Central Siberia). *Ice and Snow*, 2021, vol. 61, no. 3, pp. 420–430. (In Russ.) DOI: <https://doi.org/10.31857/S2076673421030098>.
25. Vasilevich M.I., Kondratenok B.M., Ocheretenko D.P., Vasilevich R.S., Gabov D.N., Lodygin E.D. Monitoring of aerotechnogenic impact of the Syktyvkar timber industry complex. *Bulletin of the Tomsk Polytechnic University. Geo Assets Engineering*, 2021, vol. 332, no. 10, pp. 33–44. (In Russ.) DOI: <https://doi.org/10.18799/24131830/2021/10/3395>.
26. Minakova E.A., Shlychkov A.P. Deposition of nutrients with precipitation in the Middle and Lower Volga basin. *Problems of regional ecology*, 2018, no. 6, pp. 92–97. (In Russ.)
27. Madibekov A.S., Amirgaliev N.A., Mұsaқылызы A., Ismukhanova L.T., Kulbekova R.A., Zhədi A.Ə., Sultanbekova B.M., Bolatov K.M., Kairanbaeva A.B., Manapov S.T. *Geoecological monitoring of depositing environments of the Ile River delta and the state natural reserve*. (In Russ.) Available at: https://ingeo.kz/?page_id=9391 (accessed 1 October 2023).
28. Noskova T.V., Lovtskaya O.V., Papina T.S., Panina M.S. Distribution of organic substances in the snow cover of Barnaul. *Environment and Human: Ecological Studies*, 2020, vol. 10, no. 4, pp. 447–458. (In Russ.) DOI: <https://doi.org/10.31862/2500-2961-2020-10-4-447-458>.
29. Kamanina I.Z., Kaplina S.P., Makarov O.A., Klikodueva N.A. *Comprehensive assessment of the ecological state of the science city of Dubna*. Dubna, JINR Publ., 2019. 168 p. (In Russ.)
30. Wang X., Chen M., Gong P., Wang C. Perfluorinated alkyl substances in snow as an atmospheric tracer for tracking the interactions between westerly winds and the Indian Monsoon over western China. *Environment International*, 2019. vol. 124, pp. 294–301. DOI: <https://doi.org/10.1016/j.envint.2018.12.057>.
31. Shi G., Ma H., Hu Z., Chen Z., An C., Jiang S., Li Y., Ma T., Yu J., Wang D., Lu S., Sun B., Hastings M.G. Brief communication: spatial and temporal variations in surface snow chemistry along a traverse from coastal East Antarctica to the ice sheet summit (Dome A). *The Cryosphere*, 2021, vol. 15, no. 2, pp. 1087–1095. DOI: <https://doi.org/10.5194/tc-15-1087-2021>.
32. Cairns R.L.W., Turetta C., Maffezzoli N., Magand O., Araujo B.F., Angot H., Segato D., Cristofanelli P., Sprovieri F., Scarchilli C., Grigioni P., Ciardini V., Barbante C., Dommergue A., Spolaor A. Show more mercury in precipitated and surface snow at Dome C and a first estimate of mercury depositional fluxes during the Austral summer on the high Antarctic plateau. *Atmospheric Environment*, 2021, vol. 262. DOI: <https://doi.org/10.1016/j.atmosenv.2021.118634>.
33. RD 52.18.717-2009. *Methodology for calculating the dispersion of pollutants in the atmosphere during emergency emissions*. - Moscow, Roshydromet Publ.; Ministry of Natural Resources and Environment of the Russian Federation Publ., 2012. 276 p. (In Russ.)
34. RD 52.18.826-2015. *Instructions for hydrometeorological stations and posts. Issue 12. Observations on radioactive contamination of the natural environment*. Ministry of Natural Resources and Ecology of the RF, 2015. (In Russ.)
35. Review of the background state of the natural environment in the CIS countries for 2017. Ed. by G.M. Chernogaeva. Moscow, Yu.A. Izrael Institute of Global Climate and Ecology Publ., 2018. 99 p. (In Russ.)
36. Vinogradova A.A., Kotova E.I. Assessment of heavy metal fluxes from the atmosphere to the Barents Sea. *Proceedings of the Fersman scientific session of the State Institute of Science and Technology of the KSC RAS*, 2019, no. 16, pp. 63–67. (In Russ.) DOI: <https://doi.org/10.31241/FNS.2019.16.013>.
37. Li Y., Long Y., Yang H., Huang Z., Huang G. Atmospheric deposition of cadmium around a large copper smelter: characteristics and correlations with meteorological factors. *Water, Air, & Soil Pollution*, 2023, vol. 234. DOI: <https://doi.org/10.1007/s11270-023-06206-x>.
38. Mamun A.A., Zhang L., Yang F., Cheng I., Qiu X. Atmospheric deposition mapping of particulate elements in the Canadian Athabasca oil sands region. *Environmental Pollution*, 2023, vol. 331. DOI: <https://doi.org/10.1016/j.envpol.2023.121868>.

Information about the authors

Natalia I. Ianchenko, Dr. Sc., Leading Researcher, Irkutsk National Research Technical University, 83, Lermontov street, Irkutsk, 664074, Russian Federation; fduecn@bk.ru

Received: 08.11.2023

Revised: 26.01.2024

Accepted: 09.09.2024

Компьютерная верстка *О.Ю. Аршинова*
Корректura 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

Подписано к печати 27.09.2024. Дата выхода журнала: 30.09.2024.
Формат 60х84/8 (А4). Бумага «Снегурочка».
Печать XEROX. Усл. печ. л. 26,87. Уч.-изд. л. 24,3.
Заказ 321-24. Тираж 500 экз. Цена свободная.



Издательство

ТОМСКИЙ ПОЛИТЕХНИЧЕСКИЙ УНИВЕРСИТЕТ

Адрес учредителя, редакции, издателя, типографии:
634050, г. Томск, пр. Ленина, 30.