ТОМСКИЙ
ПОЛИТЕХНИЧЕСКИЙ
УНИВЕРСИТЕТ

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

# ИЗВЕСТИЯ
# ТОМСКОГО ПОЛИТЕХНИЧЕСКОГО УНИВЕРСИТЕТА
# ИНЖИНИРИНГ ГЕОРЕСУРСОВ

Том 333, № 1, 2022

Издательство
Томского политехнического университета
2022

# ИЗВЕСТИЯ ТОМСКОГО ПОЛИТЕХНИЧЕСКОГО УНИВЕРСИТЕТА. ИНЖИНИРИНГ ГЕОРЕСУРСОВ

**Редакционная коллегия**

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

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

Подписной индекс в объединённом каталоге «Пресса России» – 18054

© ФГАОУ ВО НИ ТПУ, 2022

**УВАЖАЕМЫЕ ЧИТАТЕЛИ!**

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

Учредителем является Томский политехнический университет.

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

ISSN (print) – 2500-1019
ISSN (on_line) – 2413-1830

«Известия Томского политехнического университета. Инжиниринг георесурсов» публикует оригинальные работы, обзорные статьи, очерки и обсуждения, охватывающие последние достижения в области геологии, разведки и добычи полезных ископаемых, технологии транспортировки и глубокой переработки природных ресурсов, энергоэффективного производства и преобразования энергии на основе полезных ископаемых, а также безопасной утилизации 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 333, № 1, 2022

Tomsk Polytechnic University Publishing House
2022

# BULLETIN OF THE TOMSK POLYTECHNIC UNIVERSITY. GEO ASSETS ENGINEERING


**Editorial Board**

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


© Tomsk Polytechnic University, 2022

**AIMS AND SCOPES**

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

The journal was founded in 1903.

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

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

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

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

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

- Geo Assets exploration and refining;
- Geo Assets mining and transportation;
- Geo Assets deep processing;
- Energy-efficient production and conversion of energy based on Geo Assets;
- Safe disposal of Geo Assets and 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

**Синтез алгоритма управления автономной системой энергоснабжения с использованием кватернионов**
Нос О.В., Коровин А.В., Кучак С.В. 7

**Новые данные по возрасту угленосных отложений Юго-Западного Приморья и их значение для стратиграфии кайнозоя Дальневосточного региона**
Чащин А.А., Павлюткин Б.И., Чекрыжов И.Ю., Хубанов В.Б., Цуцуми Ю., Чащин С.А. 15

**Моделирование автоматической системы регулирования температуры процесса стабилизации катализата в условиях неопределенности**
Джамбеков А.М., Дмитриевский Б.С. 26

**Возможности определения типа смачиваемости коллекторов по данным каротажа при оптимизации системы заводнения нефтяных пластов**
Галкин С.В., Колычев И.Ю., Ракинцев В.А. 34

**Радиоактивные (Th, U) и редкоземельные элементы в природных водах центрального Сихотэ-Алиня (Приморский Край)**
Ветошкина А.В., Чекрыжов И.Ю., Паничев А.М., Вах Е.А., Барановская Н.В., Луценко Т.Н. 45

**Первые результаты комплексных изотопно-гидрогеохимических исследований Новобибеевского проявления радоновых вод**
Новиков Д.А., Дульцев Ф.Ф., Максимова А.А., Пыряев А.Н., Фаге А.Н., Хващевская А.А., Деркачев А.С., Черных А.В. 57

**Эксперимент по оценке самоочищения обского болота (Западная Сибирь, Томская Область)**
Савичев О.Г., Гусева Н.В., Хващевская А.А., Иванов А.Ю., Ян Хэн, Чжоу Дань 73

**Образование трещин гидравлического разрыва пласта в карбонатных сложнопостроенных коллекторах с естественной трещиноватостью**
Мартюшев Д.А., Пономарева И.Н., Филиппов Е.В., Ли Ювэй 85

**Особенности миграции тяжелых металлов в системе «придонная вода – поровая вода – поверхностный слой донных отложений» прибрежной зоны восточной части финского залива в весенне-летний период**
Кудрявцева В.А., Шигаева Т.Д., Панкратова Н.М. 95

**Численное решение обратных задач при математическом моделировании геологических систем**
Тарасенко Е.О., Гладков А.В. 105

**Оценка срока службы изоляции кабельных изделий для систем питания и управления горношахтного электрооборудования**
Леонов А.П., Солдатенко Т.М. 113

**Volatility of chemical elements during the dehydration of secondary sulfates**
Bortnikova S.B., Abrosimova N.A., Devyatova A.Yu., Shevko E.P., Yurkevich N.V., Cherny N.K., Danilenko I.V., Palchik N.A. 121

**Применение метода Нелдера–Мида для оптимизации одноименнополюсного синхронного двигателя для карьерного самосвала**
Прахт В.А., Дмитриевский В.А., Анучин А.С., Казакбаев В.М. 134

**Изотопная характеристика серы арсенопирита из центральной части залежи месторождения Чертово Корыто (Патомское Нагорье)**
Синкина Е.А., Гаврилов Р.Ю. 145

## CONTENTS

7 **Control design of standalone distribution generation system in quaternion domain**
Nos O.V., Korovin A.V., Kuchak S.V.

15 **New data on the age of coal-bearing strata in the southwestern Primorye and their significance for Cenozoic stratigraphy of the Far East**
Chashchin A.A., Pavlyutkin B.I., Chekryzhov I.Yu., Khubanov V.B., Tsutsumi Yu., Chashchin S.A.

26 **Simulation of an automatic temperature control system for the stabilization catalysate process in conditions of uncertainty**
Dzhambekov A.M., Dmitrievsky B.S.

34 **Possibilities of determining the type of wettability of the collectors by logging data when optimizing the system of flooding of oil reservoirs**
Galkin S.V., Kolychev I.Yu., Rakintsev V.A.

45 **Radioactive (Th, U) and rare earth elements in natural waters of central Sikhote-Alin (Primorsky Krai)**
Vetoshkina A.V., Chekryzhov I.Yu., Panichev A.M., Vakh E.A., Baranovskaya N.V., Lutsenko T.N.

57 **Initial results of the integrated isotope-hydrogeochemical studies of the Novobibeevo occurrence of radon-rich waters**
Novikov D.A., Dultsev F.F., Maksimova A.A., Pyryaev A.N., Fage A.N., Khvashchevskaya A.A., Derkachev A.S., Chernykh A.V.

73 **Experiment for estimating self-cleaning of the Obskoe fen (Western Siberia, Tomsk region)**
Savichev O.G., Guseva N.V., Khvashchevskaya A.A., Ivanov A.Yu., Yang Heng, Zhou Dan

85 **Formation of hydraulic fracturing cracks in complicated carbonate reservoirs with natural fracturing**
Martyushev D.A., Ponomareva I.N., Filippov E.V., Yuwei Li

95 **Features of migration of heavy metals in the system «bottom water – pore water – surface layer of bottom sediments» of the coastal zone in the eastern part of the Gulf of Finland**
Kudryavtseva V.A., Shigaeva T.D., Pankratova N.M.

105 **Numerical solution of inverse problems in mathematical modeling of geological systems**
Tarasenko E.O., Gladkov A.V.

113 **Evaluation of insulation lifetime of cables for power and control systems in mining electrical equipment**
Leonov A.P., Soldatenko T.M.

121 **Летучесть химических элементов при дегидрации вторичных сульфатов**
Бортникова С.Б., Абросимова Н.А., Девятова А.Ю., Шевко Е.П., Юркевич Н.В., Черный Н.К., Даниленко И.В., Пальчик Н. А.

134 **Application of the Nelder–Mead method for optimizing a synchronous homopolar motor for a mining dump truck**
Prakht V.A., Dmitrievskii V.A., Anuchin A.S., Kazakbaev V.M.

145 **Isotopic characterization of arsenopyrite sulfur from the central part of the Chertovo Koryto deposit (Patom upland)**
Sinkina E.A., Gavrilov R.Yu.

**Прогноз литологического состава баженовской свиты на основе комплексной интерпретации геологических и геофизических материалов**
Фомин М.А., Костырева Е.А., Рыжкова С.В., Саитов Р.М., Сотнич И.С., Эдер В.Г.
154

**Lithological model of the Bazhenov Formation based on integrated interpretation of geological and geophysical materials**
Fomin M.A., Kostyreva E.A., Ryzhkova S.V., Saitov R.M., Sotnich I.S., Eder V.G.

**Динамические симуляторы в задачах диагностики штанговых глубинно-насосных установок**
Зюзев А.М., Самуэль Исаак Текле
168

**Sucker rod pumping system: challenges to develop diagnostic system and role of dynamic simulator**
Ziuzev A.M., Samuel Isaac Tecle

**Оценка эффективности использования парогазовых продуктов пиролиза древесных отходов в качестве рабочего тела в газотурбинных установках и двигателях внутреннего сгорания**
Цибульский С.А., Ларионов К.Б., Слюсарский К.В., Галашов Н.Н., Гаспарян Г.Д., Улько А.А.
178

**Evaluation of the efficiency of applying wood pyrolysis steam-gas products as a working fluid for gas turbine and internal combustion engine**
Tsibulskiy S.A., Larionov K.B., Slyusarsky K.V., Galashov N.N., Gasparyan G.D., Ulko A.A.

**Температурный режим устьевого компрессора для откачки газа из затрубного пространства нефтяной скважины**
Уразаков К.Р., Латыпов Б.М., Белозеров В.В.
190

**Temperature regime of a wellhead compressor for pumping gas from the annulus of an oil well**
Urazakov K.R., Latypov B.M., Belozerov V.V.

**Оценка остаточного загрязнения на буровых площадках ростовцевского месторождения**
Тимшанов Р.И., Колесников Р.А., Моргун Е.Н., Еделев А.В., Юркевич Н.В., Кулешова Т.А.
200

**Assessment of the residual contamination at the drilling sites of the Rostovtsevskoe field**
Timshanov R.I., Kolesnikov R.A., Morgun E.N., Edelev A.V., Yurkevich N.V., Kuleshova T.A.

**Обзор современных технологий переработки упорных золотосодержащих руд и концентратов с применением азотной кислоты**
Гордеев Д.В., Петров Г.В., Хасанов А.В., Северинова О.В.
214

**Review of modern processing technologies of refractory gold ores and concentrates with use of nitric acid**
Gordeev D.V., Petrov G.V., Khasanov A.V., Severinova O.V.

УДК 621.314.57

# СИНТЕЗ АЛГОРИТМА УПРАВЛЕНИЯ АВТОНОМНОЙ СИСТЕМОЙ ЭНЕРГОСНАБЖЕНИЯ С ИСПОЛЬЗОВАНИЕМ КВАТЕРНИОНОВ

**Нос Олег Викторович**[1],
nos@corp.nstu.ru

**Коровин Александр Владимирович**[2],
akvkorovin@ya.ru

**Кучак Сергей Викторович**[1],
kuchak.2012@corp.nstu.ru

[1] Новосибирский государственный технический университет,
Россия 630073, г. Новосибирск, пр. К. Маркса, 20.

[2] АО «ПО «СЕВЕР»,
Россия, 630027, г. Новосибирск, ул. Объединения, 3.

***Актуальность.*** *В связи с непрерывным увеличением доли производства электрической энергии на основе возобновляемых источников, к числу которых относят солнечное излучение, энергия ветра, морские приливы и т. д., которые характеризуются непостоянством и случайным характером периодов генерации мощности, все большее значение приобретают прикладные задачи бесперебойного электропитания автономных объектов с гарантированным качеством и высоким быстродействием. Зачастую нагрузка также имеет непредсказуемый характер, что проявляется в виде несимметрии подключения, скачкообразных сбросов и набросов мощности, а также в наличии нелинейных потребителей, что отражается на качестве напряжения в системе электроснабжения.*

***Цель:*** *синтез быстродействующего алгоритма управления автономной трехфазной системой электроснабжения технологических объектов минерально-сырьевого комплекса с целью обеспечения симметричного гармонического закона изменения во времени генерируемых напряжений.*

***Объекты:*** *автономная система электропитания; четырехстоечный мостовой инвертор с широтно-импульсной модуляцией, однофазная/трехфазная нагрузка.*

***Методы:*** *алгебра кватернионов, некоммутативные правила умножения мнимых единиц, принцип управления по отклонению, системы подчиненного регулирования.*

***Результаты.*** *Разработана базовая концепция построения, организации и технической реализации автономной системы генерации электрической энергии переменного тока, способ управления которой базируется на декомпозиции кватерниона трехфазных напряжений на симметричную гармоническую составляющую и компоненты, вызванные амплитудно-фазовой асимметрией и нелинейностью цепей нагрузки. Описанный в работе непрерывный закон обеспечивает высокое быстродействие мгновенной компенсации искажений в режимах отработки скачкообразных сбросов и набросов нагрузки. Экспериментальные исследования проведены на нагрузке различного рода и конфигурации: однофазной, трехфазной симметричной, а также двухфазной, одна фаза из которых имеет нелинейный характер потребления тока.*

***Ключевые слова:***
*Автономная система электроснабжения, автономный инвертор напряжения, однофазная нагрузка, трехфазная нагрузка, кватернион напряжений.*

## Введение

В настоящее время в связи с интенсивным освоением природных ресурсов в районах Крайнего Севера и Арктического региона, относящихся к неэлектрифицированным территориям, все большую актуальность и значимость приобретают прикладные задачи бесперебойного и качественного электропитания основного и вспомогательного технологического оборудования, занятого в процессе добычи, подготовки и переработки полезных ископаемых [1]. Автономные системы электроснабжения данного класса, как правило, состоят из одной или нескольких дизель-генераторных электростанций соответствующей мощности с ветро-солнечными установками, аккумуляторной батареи, промежуточного накопителя энергии емкостного типа, а также автономного инвертора напряжения на основе трёхстоечной топологии с разделительными конденсаторами [2] или четырёхстоечной мостовой схемы [3] с выходным индуктивно-емкостным (LC) фильтром, причем последнее схемотехническое решение обладает рядом преимуществ над первым [4].

Отличительной особенностью эксплуатации электротехнического комплекса данного типа является наличие существенно нелинейных трехфазных промышленных и, в ряде случаев, однофазных коммунально-бытовых потребителей. Такие нагрузки вызывают протекание большого тока в нулевом проводе, а также амплитудно-фазовую асимметрию и искажения в мгновенной форме генерируемых напряжений, которые приводят к дополнительным среднеквадратичным потерям в распределительной линии в совокупности с интенсивным старением изоляции [5]. Для исключения негативного влияния вышеуказанных возмущающих факторов на практике применяют специальные алгоритмы компенсации на основе класси-

ческих пропорционально-интегральных [6], пропорционально-резонансных [7] и пропорционально-интегрально-дифференцирующих [8] регуляторов в различных системах координат [9], нелинейных гистерезисных законах [10], скользящих режимах [11], модального [12] или прогнозирующего [13] управления и т. д., которые, однако, не обеспечивают быструю реакцию на скачкообразный сброс/наброс нагрузки и приемлемое качество электрической энергии. В этой связи данная статья посвящена новому подходу к синтезу быстродействующей системы управления четырехстоечным полупроводниковым преобразователем в кватернионном базисе, позволяющему устранить из состава генерируемых трехфазных напряжений обратную и нулевую последовательность фаз на основной частоте, а также высокочастотные гармонические составляющие.

### Математическая модель четырехпроводной системы генерирования

На рис. 1 изображена упрощенная функциональная схема автономной системы электроснабжения, состоящей из инвертора напряжений АИН с полностью управляемыми полупроводниковыми ключами, собранного по мостовой схеме с четырьмя стойками, звена постоянного тока с напряжением $u_{dc}$, формируемого при помощи внешнего источника электрической энергии, силового LC-фильтра с емкостью конденсаторов $C_f$ и тремя одинаковыми дросселями с активным сопротивлением $R_f$ и индуктивностью $L_f$, а также дросселя с параметрами $R_N$, $L_N$, включенного между четвертой стойкой $N$ и нейтральной точкой $O$ нагрузки произвольного вида [14].

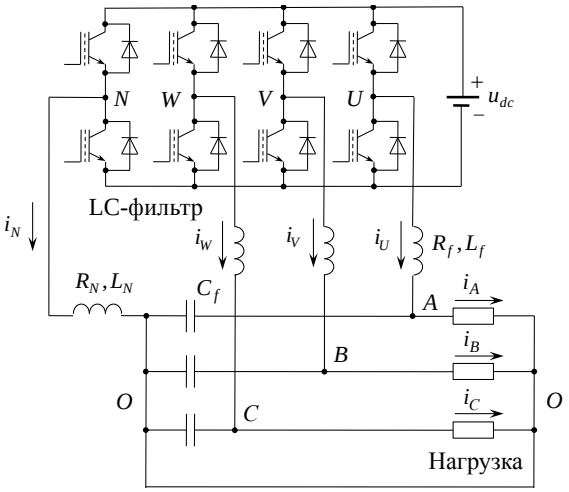



***Рис. 1.*** *Упрощенная функциональная схема трехфазной системы электроснабжения на базе четырехстоечного мостового инвертора*

***Fig. 1.*** *Simplified configuration of three-phase distribution generation system based on four-leg full-bridge inverter*

Векторно-матричная математическая модель силовой схемы, изображенной на рис. 1, описывается следующими дифференциальными и алгебраическими уравнениями:

$$\begin{cases} L_f \dfrac{d\mathbf{i}_{UWV}}{dt} = u_{dc}\mathbf{S} - R_f \mathbf{i}_{UWV} - \mathbf{u}_{ABC} + L_N \dfrac{d\mathbf{i}_N}{dt} + R_N \mathbf{i}_N, \\ C_f \dfrac{d\mathbf{u}_{ABC}}{dt} = \mathbf{i}_{UWV} - \mathbf{i}_{ABC}, \end{cases}$$

$$i_N = -\sum_{j=U,V,W} i_j,$$

где $\mathbf{u}_{ABC}$ – алгебраический вектор трехфазных напряжений на выходе LC-фильтра

$$\mathbf{u}_{ABC} = \begin{bmatrix} u_{AO} & u_{BO} & u_{CO} \end{bmatrix}^{\mathrm{T}};$$

$\mathbf{i}_{UVW}$, $\mathbf{i}_{ABC}$, $\mathbf{i}_N$ – алгебраические векторы токов на выходе АИН, в нагрузке и в дросселе с параметрами $R_N$, $L_N$ соответственно

$$\mathbf{i}_{UVW} = \begin{bmatrix} i_U & i_V & i_W \end{bmatrix}^{\mathrm{T}}, \ \mathbf{i}_{ABC} = \begin{bmatrix} i_A & i_B & i_C \end{bmatrix}^{\mathrm{T}},$$

$$\mathbf{i}_N = \begin{bmatrix} i_N & i_N & i_N \end{bmatrix}^{\mathrm{T}};$$

$\mathbf{S}$ – алгебраический вектор переключающих функций инвертора $S_U$, $S_V$, $S_W$, $S_N$ [13], которые принимают значение 1 при включении верхнего полупроводникового ключа соответствующей стойки и 0 при нахождении в открытом состоянии нижнего транзистора

$$\mathbf{S} = \begin{bmatrix} s_U - s_N \\ s_V - s_N \\ s_W - s_N \end{bmatrix}.$$

В заключение также необходимо отметить, что математическая модель объекта в координатных осях $d$, $q$, $o$ представлена в [8].

### Декомпозиция кватерниона напряжения

Математический аппарат кватернионов представляет собой некоммутативную алгебру с делением, оперирующую математическими объектами следующего вида [15, 16]

$$\mathbf{\Lambda} = \lambda_0 1 + \lambda_1 \mathbf{q}_1 + \lambda_2 \mathbf{q}_2 + \lambda_3 \mathbf{q}_3, \qquad (1)$$

где $\lambda_0$, $\lambda_1$, $\lambda_2$, $\lambda_3$ – вещественные коэффициенты; $\mathbf{q}_1$, $\mathbf{q}_2$, $\mathbf{q}_3$ – мнимые единицы, для которых совместно с одной действительной 1 постулируются 16 правил умножения [17]

$$1\mathbf{q}_k = \mathbf{q}_k 1 = \mathbf{q}_k, \ \ \mathbf{q}_k \mathbf{q}_l = -\delta_{kl} + \varepsilon_{klm}\mathbf{q}_m, \qquad (2)$$

здесь $k,l,m$=1,2,3 – нижний индекс, показывающий порядковый номер мнимой единицы; $\delta_{kl}$ – трехмерный символ Кронекера, симметричный по своим индексам $\delta_{kl}=\delta_{lk}$

$$\delta_{kl} = \begin{cases} 1, \ \text{при } k = l, \\ 0, \ \text{при } k \neq l; \end{cases}$$

$\varepsilon_{klm}$ – трехмерный символ Леви-Чивиты, антисимметричный по индексам, равный

$$\varepsilon_{123} = \varepsilon_{231} = \varepsilon_{312} = 1, \varepsilon_{213} = \varepsilon_{321} = \varepsilon_{132} = -1$$

и равный нулю, если два или три индекса равны друг другу.

Первый член в правой части (1) носит название скалярной (действительной) части $\mathrm{scal}\mathbf{\Lambda}=\lambda_0$, а три оставшиеся образуют между собой векторную (мнимую) составляющую

$$\mathrm{vect}\mathbf{\Lambda} = \lambda_1\mathbf{q}_1 + \lambda_2\mathbf{q}_2 + \lambda_3\mathbf{q}_3 .$$

В свою очередь деление выполняется при помощи обратного кватерниона

$$\mathbf{\Lambda}^{-1} = |\mathbf{\Lambda}|^{-2}\,\hat{\mathbf{\Lambda}},$$

здесь $\hat{\mathbf{\Lambda}} = \mathrm{scal}\mathbf{\Lambda} - \mathrm{vect}\mathbf{\Lambda}$ – сопряженный кватернион; $|\mathbf{\Lambda}| = \sqrt{\mathbf{\Lambda}\hat{\mathbf{\Lambda}}} = \sqrt{\hat{\mathbf{\Lambda}}\mathbf{\Lambda}}$ – модуль $\mathbf{\Lambda}$.

На основании вышесказанного представим эталонные трехфазные гармонические напряжения с амплитудой $u_m$=const и угловой частотой $\omega=100\pi$ с$^{-1}$ следующего вида [5]

$$\begin{cases} u^*_{AO} = u_m \cos\omega t, \\ u^*_{BO} = u_m \cos(\omega t - 2\pi/3), \\ u^*_{CO} = u_m \cos(\omega t + 2\pi/3), \end{cases} \tag{3}$$

в форме чисто векторного кватерниона

$$\mathbf{U}_* = u^*_{AO}\mathbf{q}_1 + u^*_{BO}\mathbf{q}_2 + u^*_{CO}\mathbf{q}_3 .$$

Для текущих значений переменных, формируемых на выходе силового LC-фильтра, по аналогии получим:

$$\mathbf{U}_{ABC} = u_{AO}\mathbf{q}_1 + u_{BO}\mathbf{q}_2 + u_{CO}\mathbf{q}_3 .$$

Далее осуществим произведение двух данных кватернионов друг на друга, в результате чего с учетом (2) получаем

$$\mathbf{\Delta}_{ABC} = \mathbf{U}_*\mathbf{U}_{ABC} = \mathrm{scal}\mathbf{\Delta}_{ABC} + \mathrm{vect}\mathbf{\Delta}_{ABC},$$

здесь $\mathrm{scal}\mathbf{\Lambda}_{ABC}$, $\mathrm{vect}\mathbf{\Lambda}_{ABC}$ – скалярная и векторная компоненты специального кватерниона, который содержит в себе информацию обо всех мгновенных отклонениях между желаемыми $u^*_{AO}$, $u^*_{BO}$, $u^*_{CO}$ и реальными $u_{AO}$, $u_{BO}$, $u_{CO}$ напряжениями

$$\mathrm{scal}\mathbf{\Delta}_{ABC} = \delta_{ABC},\ \mathrm{vect}\mathbf{\Delta}_{ABC} = \delta_A\mathbf{q}_1 + \delta_B\mathbf{q}_2 + \delta_C\mathbf{q}_3,$$

здесь $\delta_{ABC}$, $\delta_A$, $\delta_B$, $\delta_C$ – вещественные коэффициенты вида

$$\delta_{ABC} = -u^*_{AO}u_{AO} - u^*_{BO}u_{BO} - u^*_{CO}u_{CO},$$
$$\delta_A = u^*_{BO}u_{CO} - u^*_{CO}u_{BO},$$
$$\delta_B = u^*_{CO}u_{AO} - u^*_{AO}u_{CO},\ \delta_C = u^*_{AO}u_{BO} - u^*_{BO}u_{AO}.$$

Основным достоинством данного подхода к анализу энергетических характеристик трехфазных систем переменного тока является возможность достаточно простым путем выделить из суммарного потока электрической энергии все неэффективные составляющие, вызванные асимметрией и нелинейностью процесса энергопотребления. В частности, как показано в [17, 18], в случае чисто резистивной симметричной трехфазной нагрузки $\mathrm{scal}\mathbf{\Lambda}_{ABC}$=const и $\mathrm{vect}\mathbf{\Lambda}_{ABC}$=0, при наличии в электрической цепи реактивных элементов $\mathrm{scal}\mathbf{\Lambda}_{ABC}$ и $\mathrm{vect}\mathbf{\Lambda}_{ABC}$ становятся постоянными величинами, а при появлении искажений в мгновенной форме $u_{AO}$, $u_{BO}$, $u_{CO}$ в скалярной $\mathrm{scal}\mathbf{\Lambda}_{ABC}$ и векторной $\mathrm{vect}\mathbf{\Lambda}_{ABC}$ частях возникают мультигармонические колебания.

Для декомпозиции $\mathbf{U}_{ABC}$ воспользуемся обратным кватернионом эталонных напряжений

$$\mathbf{U}_{ABC} = \mathbf{U}_*^{-1}\left(\mathrm{scal}\mathbf{\Delta}_{ABC} + \mathrm{vect}\mathbf{\Delta}_{ABC}\right) = \mathbf{U}^+_{ABC} + \mathbf{U}^-_{ABC},$$

где $\mathbf{U}^+_{ABC}$, $\mathbf{U}^-_{ABC}$ – кватернионы, отвечающие за симметричную гармоническую составляющую прямой последовательности фаз и отклонения от $\mathbf{U}_*$ вследствие параметрической асимметрии и наличия высокочастотных гармоник.

$$\mathbf{U}^+_{ABC} = \mathbf{U}_*^{-1}\mathrm{scal}\overline{\mathbf{\Delta}}_{ABC},$$
$$\mathbf{U}^-_{ABC} = \mathbf{U}_*^{-1}\left(\mathrm{scal}\tilde{\mathbf{\Delta}}_{ABC} + \mathrm{vect}\mathbf{\Delta}_{ABC}\right) = \tag{4}$$
$$= \mathbf{U}_{ABC} - \mathbf{U}_*^{-1}\mathrm{scal}\overline{\mathbf{\Delta}}_{ABC},$$

здесь $\mathrm{scal}\overline{\mathbf{\Delta}}_{ABC}, \mathrm{scal}\tilde{\mathbf{\Delta}}_{ABC}$ – постоянная (средняя) и изменяющаяся во времени составляющие скалярной части $\mathbf{\Delta}_{ABC}$ соответственно, причем [17]

$$\mathrm{scal}\mathbf{U}^-_{ABC} = |\mathbf{U}_{ABC}|^{-2}\left(u^*_{AO}\delta_A + u^*_{BO}\delta_B + u^*_{CO}\delta_C\right) = 0.$$

В заключение также необходимо отметить, что применение кватернионов позволяет достаточно просто реализовывать координатное преобразование трехфазных переменных в силу того, что для данных целей используется только четыре кинематических параметра с одним уравнением связи вместо девяти элементов квадратной матрицы направляющих косинусов [15]. Так, например, инвариантный относительно скалярного произведения переход в координаты $\alpha$, $\beta$, $o$ (Clarke Transformation) [19] осуществляется при помощи следующего равенства

$$\mathbf{X}_{\alpha\beta o} = \mathbf{\Lambda}_{\alpha\beta o}\mathbf{X}_{ABC}\mathbf{\Lambda}^{-1}_{\alpha\beta o} = x_\alpha\mathbf{q}_1 + x_\beta\mathbf{q}_2 + x_o\mathbf{q}_3, \tag{5}$$

здесь $\mathbf{\Lambda}_{\alpha\beta o}$ – нормированный кватернион с вещественными коэффициентами

$$\lambda_0 = 0{,}8805,\ \lambda_1 = 0{,}3647,\ \lambda_2 = -0{,}2798,\ \lambda_3 = 0{,}1159,$$

а поворот на электрический угол $\gamma$ плоскости с осями $\mathbf{q}_1$, $\mathbf{q}_2$ относительно третьей мнимой единицы $\mathbf{q}_3$, который соответствует преобразованию Парка–Горева (Park Transformation) [20], выполняется в следующем виде

$$\mathbf{\Lambda}_{dqo} = \cos\frac{\gamma^*_u}{2} + \sin\frac{\gamma^*_u}{2}\mathbf{q}_3,$$

в результате чего становится справедливым

$$\mathbf{X}_{dqo} = \left(x_\alpha\cos\gamma^*_u - x_\beta\sin\gamma^*_u\right)\mathbf{q}_1 +$$
$$+\left(x_\alpha\sin\gamma^*_u + x_\beta\cos\gamma^*_u\right)\mathbf{q}_2 + x_o\mathbf{q}_3 = x_d\mathbf{q}_1 + x_q\mathbf{q}_2 + x_o\mathbf{q}_3. \tag{6}$$

В свою очередь обратное координатное преобразование из $d$, $q$, $o$ в $\alpha$, $\beta$, $o$ и затем из $\alpha$, $\beta$, $o$ в $A$, $B$, $C$ строится при помощи изменения порядка чередования прямого и обратного нормированных кватернионов

$$\mathbf{X}_{\alpha\beta o} = \mathbf{\Lambda}^{-1}_{dqo}\mathbf{X}_{dqo}\mathbf{\Lambda}_{dqo} = x_\alpha\mathbf{q}_1 + x_\beta\mathbf{q}_2 + x_o\mathbf{q}_3, \tag{7}$$

$$\mathbf{X}_{ABC} = \mathbf{\Lambda}^{-1}_{\alpha\beta o}\mathbf{X}_{\alpha\beta o}\mathbf{\Lambda}_{\alpha\beta o} = x_A\mathbf{q}_1 + x_B\mathbf{q}_2 + x_C\mathbf{q}_3. \tag{8}$$

**Система стабилизации трехфазных напряжений на нагрузке с использованием кватернионов**

Автономная система электропитания силового электрооборудования, занятого в технологических процессах добычи, транспортировании и переработки углеводородного сырья и других полезных ископаемых, а также коммунально-бытовых потребителей, строится в кватернионом базисе в соответствии с принципами управления по отклонению, последовательной коррекции и подчиненного регулирования [15], что иллюстрирует рис. 2, на котором используются следующие обозначения: ПК1, ПК2 – преобразователи кватерниона трехфазных токов инвертора из *A*, *B*, *C* в *d*, *q*, *o* и обратно, построенные на основании формул (5)–(8) соответственно; РН, $\text{РН}_{dqo}$ – ПИ-регуляторы модуля $|\mathbf{U}_{dqo}|$ и отклонений $u_{AO}$, $u_{BO}$, $u_{CO}$ от эталона (3); $\text{РТ}_{dqo}$ – трехканальный ПИ-регулятор выходного тока АИН в осях *d*, *q*, *o*; ТА – тригонометрический анализатор, осуществляющий вычисление $|\mathbf{U}_*|$ и оценку углового положения кватерниона трехфазных эталонных напряжений $\hat{\gamma}_u^*$; ДПР – динамическая подсистема определения текущей величины модуля измеренного кватерниона напряжений $|\mathbf{U}_{dqo}|$ и его разделения в *d*, *q*, *o* осях на две составляющие $\mathbf{U}^+_{ABC}$ и $\mathbf{U}^-_{ABC}$ в соответствии с (4), в которой для получения информации о постоянной составляющей $\text{scal}\overline{\mathbf{\Delta}}_{dqo}$ использовался фильтр низких частот второго порядка с передаточной функцией

$$W(p) = \frac{1}{p^2 + A\Omega p + \Omega^2},$$

здесь *p* – оператор дифференцирования; *A*, Ω – коэффициент формы и среднегеометрический корень соответственно.

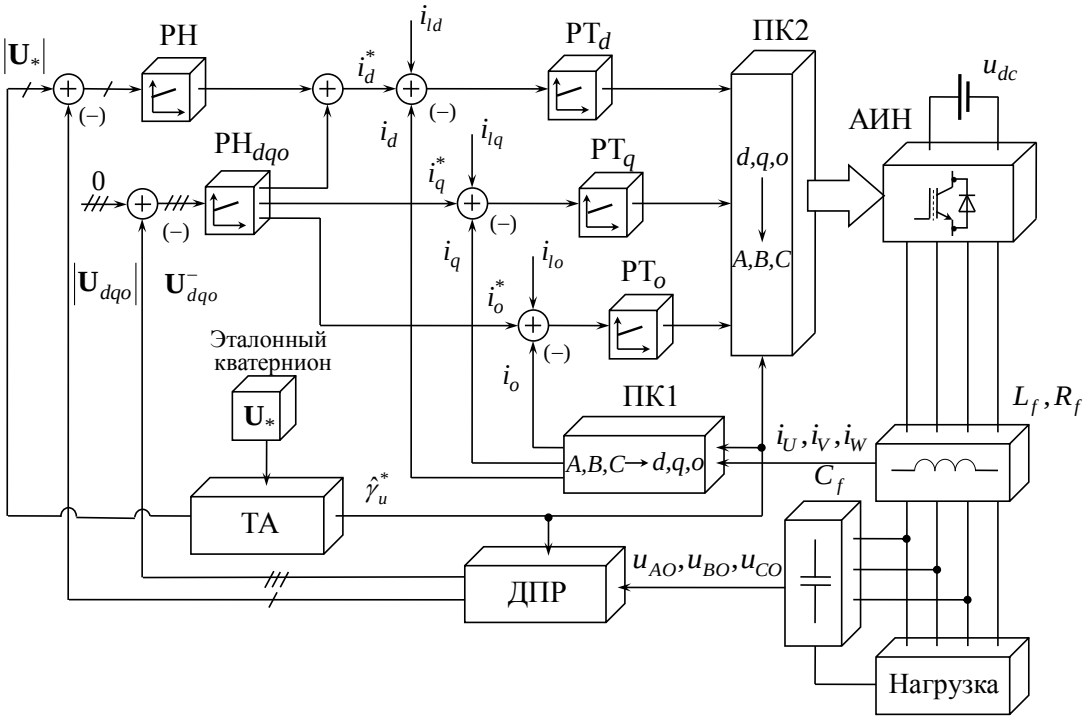



***Рис. 2.*** *Система управления четырехстоечным преобразователем в кватернионном базисе*
***Fig. 2.*** *Control system of the four-leg VSI in quaternion domain*

Для повышения быстродействия и компенсации внешних возмущений к выходам ПИ-регуляторов $\text{РН}_{dqo}$ добавлялись токи нагрузки $i_{ld}$, $i_{lq}$, $i_{lo}$ в соответствующих осях после прохождения через апериодический фильтр с постоянной времени $(2\pi 12 \cdot 10^3)^{-1}$ с [8].

В целях практической верификации разработанного алгоритма стабилизации напряжений на нагрузке в терминах алгебры кватернионов были выполнены экспериментальные исследования на специализированной установке, внешний вид которой приведен на рис. 3, которая состояла из полупроводникового преобразователя с частотой ШИМ, равной 15 кГц, и напряжением звена постоянного тока 539 В, силового LC-фильтра на выходе четырехстоечного мостового инвертора с параметрами $C_f$=6,8 мкФ и $L_f$=0,58 мГн, а также дросселя в нейтральной линии с аналогичной индуктивностью $L_N$=0,58 мГн.

Внутренний трехканальный контур регулирования выходных токов инвертора настраивался на полосу пропускания в замкнутом состоянии $\omega_i = 2\pi 750$ с$^{-1}$, а внешний по отношению к нему контур модуля кватерниона текущих напряжений и их отклонений – на аналогичный параметр, равный $\omega_u = 2\pi 250$ с$^{-1}$. Желаемое амплитудное значение напряжений $u_m$ принималось равным 250 В, фильтр низких частот в блоке ДПР имел биномиальное распределение корней со среднегеометрическим корнем 100 с$^{-1}$, а фиксация трехфазных переменных осуществлялось с помощью многоканального измерительного комплекса «Genesis Gen7T».

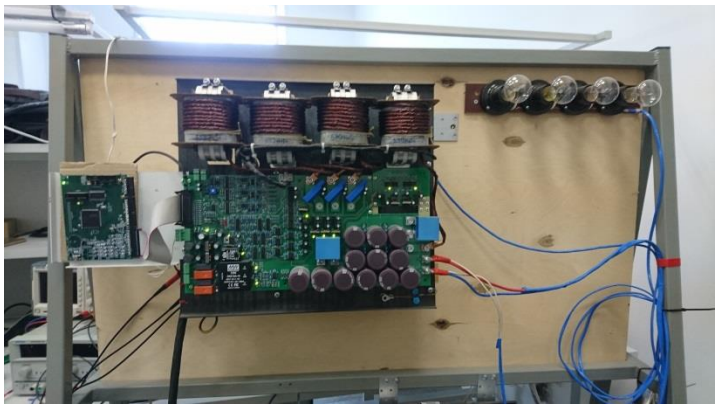


***Рис. 3.*** *Внешний вид экспериментальной установки*
***Fig. 3.*** *Photograph of experimental platform*

На рис. 4 изображен гармонический состав трехфазных напряжений на выходе силового LC-фильтра в режиме холостого хода, а на рис. 5, *а*, *б* – осциллограммы напряжений и токов нагрузки при включении однофазного резистивного потребителя и скачкообразном уменьшении сопротивления двухфазной нелинейной цепи соответственно.

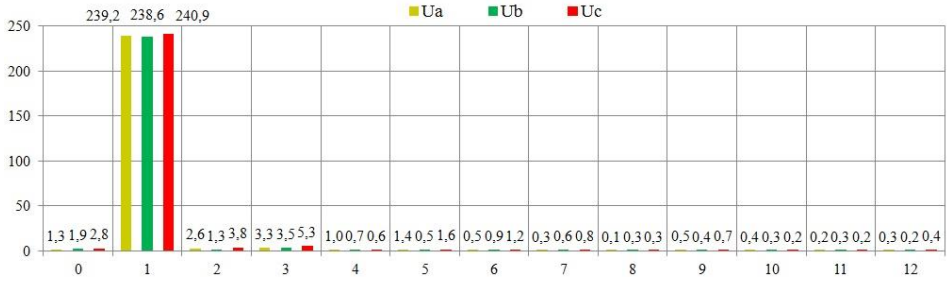
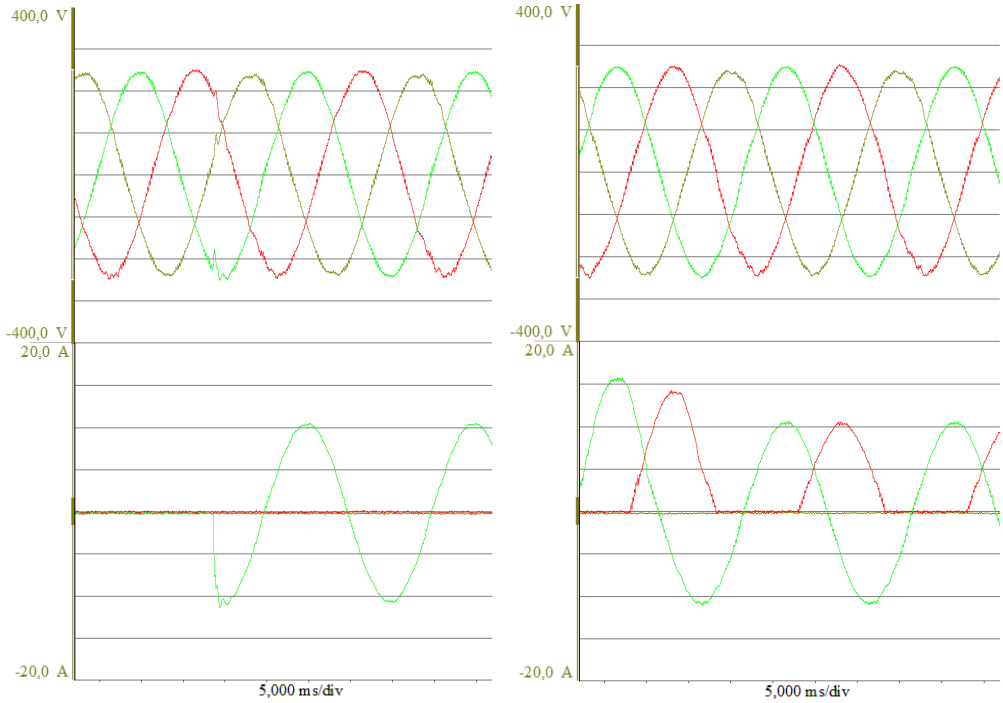



***Рис. 4.*** *Гармонический спектр генерируемых напряжений в режиме холостого хода*
***Fig. 4.*** *Harmonic spectrum of produced voltages at no-load mode*




*а/a* *б/b*

***Рис. 5.*** *Трехфазные напряжения и токи на стороне потребителя при скачкообразном изменении однофазной (а) и двухфазной (б) нагрузки*
***Fig. 5.*** *Load three-phase voltages and currents under step change of single-phase (a), two-phase (b) loads*

Как видно из представленных выше результатов выполненного эксперимента, практическое применение алгебры кватернионов обеспечивает нормированное качество электрической энергии в статических режимах работы и требуемое быстродействие отработки внешних возмущающих воздействий в динамике. Генерируемые автономной системой электроснабжения трехфазные напряжения имеют близкую к гармонической мгновенную форму с незначительным отклонением установившегося амплитудного значения от заданной величины $u_m$=250 В.

### Заключение

В данной статье описаны базовые положения нового алгоритмического подхода к построению и организации системы управления четырёхстоечным мостовым инвертором с выходным силовым LC-фильтром, предназначенным для бесперебойного питания различного рода технологического оборудования предприятий минерально-сырьевого комплекса, а также объектов аэрокосмической отрасли, основанного на использовании некоммутативной алгебры кватернионов. Описанный в работе непрерывный закон обеспечивает высокое быстродействие мгновенной компенсации искажений в режимах отработки скачкообразного сброса/наброса нагрузки, в том числе с нелинейными характеристиками, в совокупности с приемлемым гармоническим составом генерируемой электрической энергии и базируется на разделении кватерниона трехфазных напряжений на скалярную (действительную) и векторную (мнимую) части с последующим получением информации о положительной, отрицательной и нулевой последовательности фаз на основной частоте 50 Гц, а также о наличии мультигармонических составляющих. Математическое представление трехфазных переменных в форме кватернионов может быть применено к произвольной временной зависимости сигналов и не накладывает никаких ограничений на конкретную конфигурацию цепей потребителей, в качестве которых, например, могут выступать регулируемый электропривод переменного тока с преобразователем частоты или управляемый однофазный/трехфазный выпрямитель.

### СПИСОК ЛИТЕРАТУРЫ

1. Выравнивание графика нагрузки предприятий за счет применения гибридных накопителей электроэнергии / О.С. Васильков, Д.Е. Батуева, К.А. Хомяков, П.С. Паляницин // Известия МГТУ «МАМИ». – 2020. – № 1. – С. 27–34.
2. Fraser M.E., Manning C.D., Wells B.M. Transformerless four-wire PWM rectifier and its application in AC-DC-AC converters // IEE Proceedings – Electric Power Applications. – 1995. – V. 142. – № 6. – P. 410–416.
3. Jahns M., Maldonado M.A. A new resonant link aircraft power generating system // IEEE Transactions on Aerospace and Electronics Systems. – 1993. – V. 29. – № 1. – P. 206–214.
4. Vechiu I., Curea O., Camblong H. Transient operation of a four-leg inverter for autonomous applications with unbalanced load // IEEE Transactions on Power Electronics. – 2010. – V. 25. – № 2. – P. 399–407.
5. Nos O.V., Brovanov S.V., Dybko M.A. Development of active filtering algorithms for higher harmonics in electrical power circuits // Optoelectronics, Instrumentation and Data Processing. – 2016. – V. 52. – № 6. – P. 557–562.
6. Hsu P., Behnke M. A three-phase synchronous frame controller for unbalanced load // 29th Annual IEEE Power Electronics Specialists Conference. – Fukuoka, Japan, 1998. – P. 1369–1374.
7. Rokrok E., Hamedani M.E. Comprehensive control scheme for an inverter-based distributed generation unit // Iranian Journal of Science and Technology, Transaction B: Engineering. – 2009. – V. 33. – № B6. – P. 477–490.
8. Aboelsaud R., Ibrahim A., Garganeev A.G. Voltage control of autonomous power supply systems based on PID controller under unbalanced and nonlinear load conditions // International Youth Conference on Radio Electronics, Electrical and Power Engineering. – Moscow, 2019. – 6 p.
9. Aboelsaud R., Ibrahim A., Garganeev A.G. Review of three-phase inverters control for unbalanced load compensation // International Journal of Power Electronics and Drive System. – 2019. – V. 10. – № 1. – P. 242–255.
10. Prabhakar N., Mishra M. Dynamic hysteresis current control to minimize switching for three-phase four-leg VSI topology to compensate nonlinear load // IEEE Transactions on Power Electronics. – 2010. – V. 25. – № 8. – P. 1935–1942.
11. Zheng L., Le D. Control of a three-phase four-wire inverter // IECON 2012 – 38th Annual Conference on IEEE Industrial Electronics Society. – Montreal, QC, Canada, 2012. – P. 316–320.
12. Nasiri R., Radan A. Adaptive pole-placement control of 4-leg voltage-source inverters for standalone photovoltaic systems // Renewable Energy. – 2011. – V. 36 – № 7. – P. 2032–2042.
13. Digital predictive current control of a three-phase four-leg inverter / M. Rivera, V. Yaramasu, A. Llor, J. Rodriguez, B. Wu, M. Fadel // IEEE Transactions on Industrial Electronics. – 2013. – V. 60. – № 11. – P. 4903–4912.
14. Luis R., Silva J.F., Quadrado J.C. Quadrado output voltage quality evaluation of stand-alone four-leg inverters using linear and non-linear controllers // Energies. – 2017. – V. 10. – № 4. – P. 1–20.
15. Quaternion control of four-leg inverter for distribution system with harmonic-producing load / O.V. Nos, A.V. Korovin, N.I. Nos, E.S. Kucher // The 11th International Conference on Electrical Power Drive Systems ICEPDS 2020. – Saint Petersburg, Russia, 2020. – 6 p.
16. Three-phase quaternion power in three-wire systems / A.S.F. Komeno, A.L.F. Filho, J.Y. Ishihara, V.P. Brasil // 19th International Conference on Renewable Energy and Power Quality Journal ICREPQ'21. – Almeria, Spain, 2021. – P. 493–498.
17. Nos O.V. Control strategy of shunt active power filter based on an algebraic approach // The 16th International Conference of Young Specialists on Micro/Nanotechnologies and Electron Devices EDM 2015. – Erlagol, Altai, Russia, 2015. – P. 459–463.
18. Nos O.V., Dudin A., Petzoldt J. The instantaneous power quaternion of the three-phase electric circuit with linear load // The 17th International Conference of Young Specialists on Micro/Nanotechnologies and Electron Devices EDM 2016. – Erlagol, Altai, Russia, 2016. – P. 526–531.
19. Duesterhoeft W.C., Schulz M.W., Clarke E. Determination of instantaneous currents and voltages by means of alpha, beta, and zero components // Transactions of the American Institute of Electrical Engineers. – 1951. – V. 70. – № 2. – P. 1248–1255.
20. Park R.H. Two-reaction theory of synchronous machines // Transactions of the American Institute of Electrical Engineers. – 1929. – V. 48. – № 3. – P. 716–727.

*Поступила: 29.10.2021 г.*

### Информация об авторах

***Нос О.В.***, доктор технических наук, профессор кафедры проектирования технологических машин Новосибирского государственного технического университета.

***Коровин А.В.***, заместитель главного конструктора по разработке новых изделий АО «ПО «СЕВЕР».

***Кучак С.В.***, кандидат технических наук, старший преподаватель кафедры электроники и электротехники Новосибирского государственного технического университета.

UDK 621.314.57

# CONTROL DESIGN OF STANDALONE DISTRIBUTION GENERATION SYSTEM IN QUATERNION DOMAIN

**Oleg V. Nos**[1],
nos@corp.nstu.ru

**Aleksandr V. Korovin**[2],
akvkorovin@ya.ru

**Sergey V. Kuchak**[1],
kuchak.2012@corp.nstu.ru

[1] Novosibirsk State Technical University,
20, Karl Marx avenue, Novosibirsk, 630073, Russia.

[2] AO PO «SEVER»,
3, Obedineniya street, Novosibirsk, 630027, Russia.

***Relevance.*** *The present paper is devoted to the practical issues of ensuring uninterrupted and quality power supply for standalone industrial facilities and quick response of power supply systems that become increasingly important in the context of continuously growing portion of renewable generation, such as wind turbines, solar photovoltaic arrays, tidal power units, characterized by inconsistency and randomness of power generation periods. At same time, the load also has an unpredictable nature of consumption, which consists in unbalanced connection, abrupt power drops and surges, and the introduction of non-linear consumers, which affects the quality of the voltage in the power supply system.*
***The main aim.*** *The paper presents a method to develop a quick-response control strategy for a standalone three-phase power supply system for mineral mining and processing facilities to ensure the generated balanced voltages with sinusoidal waveforms.*
***Objects:*** *standalone power supply system; PWM four-leg full-bridge inverter, single-/three-phase load.*
***Methods:*** *quaternion algebra, noncommutative multiplication rules for imaginary units, closed-loop control, cascade systems.*
***Results.*** *The authors have developed basic concept covering the organization and implementation of a standalone AC generation system based on three-phase voltage quaternion decomposition into a balanced sinusoidal component and other components caused by amplitude-phase unbalance and nonlinear loads. The described continuous law provides a high speed of instantaneous compensation of distortions at abruptly variable load. Experimental studies were carried out on various kinds and configurations of loads: single-phase, three-phase symmetric, and also two-phase, one phase of which has a non-linear character of current consumption.*

***Key words:***
*Standalone power supply system, voltage source inverter, single-phase load, three-phase load, voltage quaternion.*

## REFERENCES

1. Vasil'kov O.S., Batueva D.E., Homyakov K.A., Palyanicin P.S. Aligning the load schedule of enterprises through the use of hybrid energy storage. *Izvestiya MGTU «MAMI»*, 2020, no. 1, pp. 27–34. In Rus.
2. Fraser M.E., Manning C.D., Wells B.M. Transformerless four-wire PWM rectifier and its application in AC-DC-AC converters. *IEE Proceedings – Electric Power Applications*, 1995, vol. 142, no. 6, pp. 410–416.
3. Jahns M., Maldonado M.A. A new resonant link aircraft power generating system. *IEEE Transactions on Aerospace and Electronics Systems*, 1993, vol. 29, no. 1, pp. 206–214.
4. Vechiu I., Curea O., Camblong H. Transient operation of a four-leg inverter for autonomous applications with unbalanced load. *IEEE Transactions on Power Electronics*, 2010, vol. 25, no. 2, pp. 399–407.
5. Nos O.V., Brovanov S.V., Dybko M.A. Development of active filtering algorithms for higher harmonics in electrical power circuits. *Optoelectronics, Instrumentation and Data Processing*, 2016, vol. 52, no. 6, pp. 557–562.
6. Hsu P., Behnke M. A three-phase synchronous frame controller for unbalanced load. *29th Annual IEEE Power Electronics Specialists Conference*. Fukuoka, Japan, 1998. pp. 1369–1374.
7. Rokrok E., Hamedani M.E. Comprehensive control scheme for an inverter-based distributed generation unit. *Iranian Journal of Science and Technology, Transaction B: Engineering*, 2009, vol. 33, no. B6, pp. 477–490.
8. Aboelsaud R., Ibrahim A., Garganeev A.G. *Voltage control of autonomous power supply systems based on PID controller under unbalanced and nonlinear load conditions*. *International Youth Conference on Radio Electronics, Electrical and Power Engineering*. Moscow, 2019. 6 p.
9. Aboelsaud R., Ibrahim A., Garganeev A.G. Review of three-phase inverters control for unbalanced load compensation. *International Journal of Power Electronics and Drive System*, 2019, vol. 10, no. 1, pp. 242–255.
10. Prabhakar N., Mishra M. Dynamic hysteresis current control to minimize switching for three-phase four-leg VSI topology to compensate nonlinear load. *IEEE Transactions on Power Electronics*, 2010, vol. 25, no. 8, pp. 1935–1942.
11. Zheng L., Le D. Control of a three-phase four-wire inverter. *IECON 2012 – 38th Annual Conference on IEEE Industrial Electronics Society*. Montreal, QC, Canada, 2012. pp. 316–320.
12. Nasiri R., Radan A. Adaptive pole-placement control of 4-leg voltage-source inverters for standalone photovoltaic systems. *Renewable Energy*, 2011, vol. 36, no. 7, pp. 2032–2042.
13. Rivera M., Yaramasu V., Llor A., Rodriguez J., Wu B., Fadel M. Digital predictive current control of a three-phase four-leg inverter. *IEEE Transactions on Industrial Electronics*, 2013, vol. 60, no. 11, pp. 4903–4912.
14. Luis R., Silva J.F., Quadrado J.C. Output voltage quality evaluation of stand-alone four-leg inverters using linear and non-linear controllers. *Energies*, 2017, vol. 10, no. 4, pp. 1–20.
15. Nos O.V., Korovin A.V., Nos N.I., Kucher E.S. Quaternion control of four-leg inverter for distribution system with harmonic-producing load. *The 11th International Conference on Electrical Power Drive Systems ICEPDS 2020*. Saint Petersburg, Russia, 2020. 6 p.
16. Komeno A.S.F., Filho A.L.F., Ishihara J.Y., Brasil V.P. Three-phase quaternion power in three-wire systems. *19th International*

*Conference on Renewable Energy and Power Quality Journal ICREPQ'21*. Almeria, Spain, 2021. pp. 493–498.
17. Nos O.V. Control strategy of shunt active power filter based on an algebraic approach. *The 16th International Conference of Young Specialists on Micro/Nanotechnologies and Electron Devices EDM 2015*. Erlagol, Altai, Russia, 2015. pp. 459–463.
18. Nos O.V., Dudin A., Petzoldt J. The instantaneous power quaternion of the three-phase electric circuit with linear load. *The 17th International Conference of Young Specialists on Micro/Nanotechnologies and Electron Devices EDM 2016*. Erlagol, Altai, Russia, 2016. pp. 526–531.
19. Duesterhoeft W.C., Schulz M.W., Clarke E. Determination of instantaneous currents and voltages by means of alpha, beta, and zero components. *Transactions of the American Institute of Electrical Engineers*, 1951, vol. 70, no. 2, pp. 1248–1255.
20. Park R.H. Two-reaction theory of synchronous machines. *Transactions of the American Institute of Electrical Engineers*, 1929, vol. 48, no. 3, pp. 716–727.

*Received: 29 October 2021.*

**Information about the authors**

***Oleg V. Nos***, Dr. Sc., professor, Novosibirsk State Technical University.
***Aleksandr V. Korovin***, deputy chief designer, AO PO «SEVER».
***Sergey V. Kuchak***, Cand. Sc., senior lecturer, Novosibirsk State Technical University.

УДК 551.77, 550.93, 621.039.86

# НОВЫЕ ДАННЫЕ ПО ВОЗРАСТУ УГЛЕНОСНЫХ ОТЛОЖЕНИЙ ЮГО-ЗАПАДНОГО ПРИМОРЬЯ И ИХ ЗНАЧЕНИЕ ДЛЯ СТРАТИГРАФИИ КАЙНОЗОЯ ДАЛЬНЕВОСТОЧНОГО РЕГИОНА

**Чащин Александр Адольфович**[1],
achashchin@mail.ru

**Павлюткин Борис Иванович**[1],
pavlyutkin@fegi.ru

**Чекрыжов Игорь Юрьевич**[1],
chekr2004@mail.ru

**Хубанов Валентин Борисович**[2],
khubanov@mail.ru

**Цуцуми Юкиясу**[3],
ytsutsu@kahaku.go.jp

**Чащин Сергей Александрович**[1],
s.cha@fegi.ru

[1] Дальневосточный геологический институт ДВО РАН,
Россия, 690022, г. Владивосток, пр. 100-летия Владивостоку, 159.

[2] Геологический институт СО РАН,
Россия, 670047, г. Улан-Удэ, ул. Сахьяновой, 6а.

[3] Национальный музей природы и науки,
Япония, 305-0005, префектура Ибараки, 4-1-1 Амакубо, Цукуба.

***Актуальность*** *исследования обусловлена необходимостью устранения существующих расхождений во взглядах на возраст палеогеновых промышленно-угленосных отложений на юго-западе Приморья и сопредельных территориях.*
***Цель:*** *осуществить U-Pb-датирования цирконов из третичных образований, встречающихся в пределах Хасанской рифтогенной впадины, что позволит в дальнейшем уточнить схему последовательности их формирования на территории юго-западного Приморья.*
***Объекты:*** *осадочные породы хасанской и назимовской свит, а также риолиты краскинского комплекса.*
***Методы.*** *Изучение зональности и внутренней структуры цирконов выполнено электронным микрозондом JXA-8100, оснащенным катодолюминесцентным детектором, U-Pb-изотопные исследования цирконов были проведены LA-ICP-MS-методом.*
***Результаты.*** *Согласно полученным результатам U-Pb-датирования цирконов из третичных образований Хасанской впадины, установлено, что возраст самой молодой популяции цирконов в песчаниках назимовской и хасанской свит составляет 37–38 млн лет, что соответствует позднему эоцену и совпадает с возрастной оценкой формирования этих свит, полученной ранее по результатам изучения микро- и макрофлоры. Установлено, что поступление цирконов самой молодой популяции в песчаники хасанской (=назимовской) свиты связано с размывом верхнеэоценовых кислых пород краскинского комплекса. Соответственно, это позволяет говорить об одновозрастности вышеперечисленных стратонов и наличии в пределах Хасанской депрессии в кайнозое одного, позднеэоценового, этапа углеобразования, а не двух, как считалось ранее. Это значительно упрощает региональную стратиграфическую шкалу применительно к Хасанской впадине и ее аналогам в других впадинах Приморья и соседних регионах юга Дальнего Востока России.*

***Ключевые слова:***
*U-Pb-датирование цирконов, кайнозой, Хасанская впадина, юго-западное Приморье, угленосные отложения, стратиграфия.*

## Введение

При разработке региональных стратиграфических схем (РСС) у геологов и палеонтологов нередко возникают расхождения во взглядах на возраст конкретных стратиграфических подразделений (стратонов). Это в полной мере относится и к палеогеновому стратиграфическому уровню на территории Приморья. Поскольку здесь находятся стратотипы большинства подразделений палеогена для всего континентального юга Дальнего Востока России, указанная проблема приобретает более широкий, трансрегиональный характер. В случае возникающих противоречий важную роль при их разрешении играют данные радиоизотопного определения возраста пород, полученные различными методами, в частности, с использованием U-Pb-датирования по цирконам. Так, например, в Приморье этот метод уже был успешно использован при решении вопроса о возрасте богопольской и тадушинской свит, распространенных на востоке Сихотэ-Алиня. Обе свиты относились прежде к раннему палеоцену, однако данные радиоизотопного датирования вулканитов богопольской свиты стимулирова-

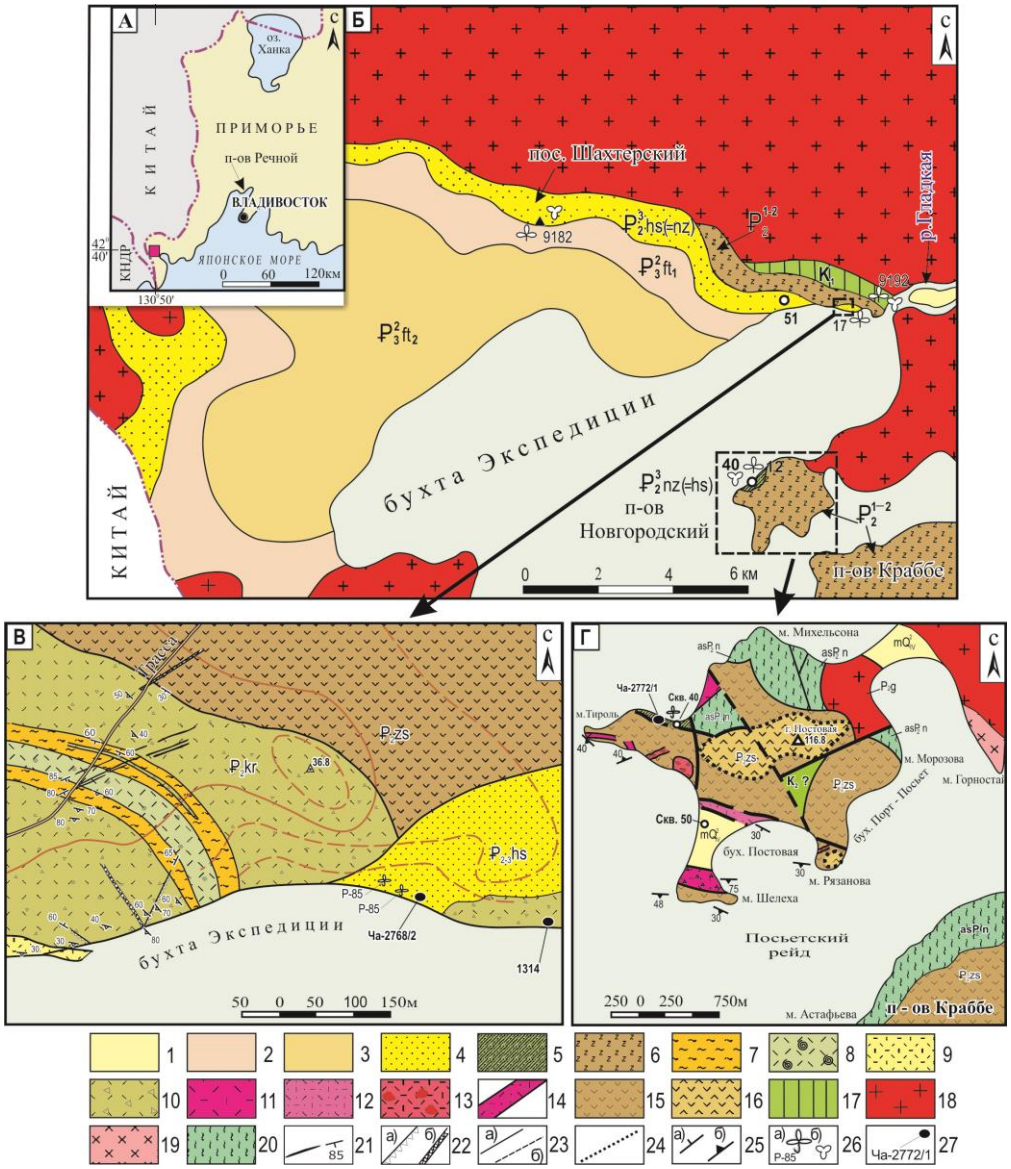
ли ревизию состава тадушинской флоры, в результате чего время ее существования, как и возраст самой свиты, сместились в интервал позднего палеоцена [1].

В данной статье изложены первые результаты радиоизотопного U-Pb-датирования цирконов из третичных образований Хасанской впадины, столь необходимые при решении весьма дискуссионной проблемы возраста палеогеновых промышленно-угленосных отложений на юго-западе Приморья и сопредельных территориях.

### Краткий исторический экскурс

Палеоген-неогеновые угленосные отложения на юго-западе Приморья локализованы в ряде кайнозойских впадин, но лучше всего они изучены в Хасанской (=Краскинской) депрессии (рис. 1, А, Б). Хасанские угли стали известны промышленникам, геологам и военным морякам еще в начале XX в. Наибольший вклад в изучение угленосных отложений на первом этапе (1940-е гг.) внес Г.М. Власов. Вначале они рассматривались им в составе одной свиты – хасанской, позднее им же была выделена более древняя, назимовская свита, также угленосная. Стратотипический разрез последней был описан на п-ове Посьет (=Новгородский) (рис. 1, Б, Г), а типовой местностью хасанской свиты считалась территория, прилегающая с севера к бухте Экспедиции (рис. 1, Б, В).

Возраст хасанской свиты изначально рассматривался в Региональных стратиграфических схемах юга Дальнего Востока как отвечающий позднему эоцену, а назимовской – интервалу поздний палеоцен – ранний эоцен [3, 4]. Несмотря на ограниченное распространение, назимовская свита традиционно играла роль одного из ключевых стратонов кайнозойского комплекса в регионе. Это объясняется тем, что Хасанская впадина была единственной структурой на юге Приморья, где предполагалось наличие палеоцена. Следует подчеркнуть, что вывод о палеоцен-эоценовом возрасте назимовской свиты основывался её автором Г.М. Власовым преимущественно на стратиграфических взаимоотношениях (отчасти предполагаемых) с другими подразделениями общего разреза кайнозоя в Хасанской депрессии.



Однако принятые взаимоотношения даже на тот момент времени не соответствовали имеющимся палеоботаническим данным. Небольшой комплекс ископаемых растений из стратотипа назимовской свиты (коллекция Г.М. Власова), согласно изучившей его М.О. Борсук, отражал эоценовый (без более дробного подразделения) этап флористической сукцессии в регионе. К сожалению, заключение о возрасте назимовской флоры не было должным образом учтено. За основу были приняты вышеупомянутые взаимоотношения с подстилающими и перекрывающими стратонами. Согласно им, нижняя граница назимовской свиты с подстилающими кислыми эффузивами позднемелового–палеоценового возраста (новопосьетская свита, по Г.М. Власову) установлена в её стратотипе на п-ове Посьет, а верхняя – с якобы перекрывающими основными эффузивами зайсановской свиты – зафиксирована в устье р. Гладкой (рис. 1, Б, В). Тип взаимоотношения андезибазальтов и подстилающих осадочных отложений в устье р. Гладкой был автоматически перенесен на геологическую ситуацию на п-ове Посьет, где для такой операции не было оснований. В этом и заключалась главная ошибка, поскольку позднее выяснилось, что осадочная толща в устье р. Гладкой (рис. 1, Б, т. 9192), принятая за палеогеновую назимовскую свиту, содержит комплекс растительных макро- и микрофоссилий раннемелового возраста [5] и потому не может быть к ней отнесена.

Согласно более поздним исследованиям, основанным на изучении кернов специально пробуренной скважины 40, назимовская свита в стратотипическом разрезе залегает на риолито-дацитовых агломератовых туфах, подстилаемых палеозойскими габброидами. Проблема взаимоотношения ее с зайсановскими эффузивами детально рассмотрена ранее [6]. Установлено, что назимовская свита в одних разрезах прислонена к основным эффузивам, в других – между ними вклиниваются кислые лавы и туфы, но она нигде не перекрывается вулканитами, как считалось прежде [4].

Анализ спорово-пыльцевых спектров из кернов скв. 40 выявил их сходство со спектрами верхнеэоценовой усть-давыдовской свиты в ее стратотипе на п-ове Речной (рис. 1). Полученные данные позволили предложить более простой и логичный вариант локальной стратиграфической схемы для кайнозоя Хасанской впадины [7]. В ней угленосные назимовская и хасанская свиты, ранее считавшиеся разновозрастными, помещены на один стратиграфический уровень (верхний эоцен), причем как единый стратон. За ним предложено сохранить название *хасанская* как более раннее и потому приоритетное, а *назимовскую* считать поздним синонимом. Согласно последним представлениям, хасанская (=назимовская) свита залегает с несогласием на образованиях широкого геохронологического диапазона от палеозойских гранитов до меловых осадочных пород и кайнозойских риолитов краскинского комплекса. Перекрывается она без признаков стратиграфического перерыва и несогласия глинисто-туффитовой толщей (=нижнефаташинской подсвитой), охарактеризованной раннеолигоценовой флорой Краскино (т. 9182). Разрез палеогена в Хасанской впадине завершает верхнефаташинская подсвита преимущественно песчаникового состава [7].

***Рис. 1.*** *Схема расположения объекта изучения (А); схематическая геологическая карта восточного сектора Хасанской впадины (Б); план геологического строения экструзивного тела риолитов краскинского комплекса и хасанской свиты (В); геологическое строение п-ова Новгородский (Г) по [2] (с изменениями и дополнениями). 1 – четвертичные аллювиальные отложения; 2, 3 – отложения нижней подсвиты (2) и верхней подсвиты (3) фаташинской свиты (ft); 4 – эоценовые вулканогенно-осадочные отложения хасанской свиты (hs); 5 – эоценовые вулканогенно-осадочные отложения назимовской свиты (nz); 6 – нерасчлененные эоценовые вулканогенные образования; 7–13 – эоценовые эффузивы краскинского комплекса (kr): 7 – измененные перлиты, 8 – стекла риолитов, 9 – флюидальные риолиты, 10 – кластолавы риолитового состава, 11 – дайки риолитов и риодацитов, 12 – туфы риолитов, 13 – эруптивные брекчии; 14 – туфы риолитов новопосьетской свиты (?); 15, 16 – эоценовые вулканиты зайсановского комплекса (zs): 15 – андезиты, 16 – андезидациты; 17 – нижнемеловые отложения гладкинской толщи; 18, 19 – граниты (18) и диориты (19) пермского возраста; 20 – метаморфические породы фундамента; 21 – кварцевые прожилки и их элементы залегания; 22 – тектонические разломы (а) и зоны дробления (б); 23 – разломы установленные (а) и предполагаемые (б); 24 – фациальные границы между андезитами и андезидацитами; 25 – ориентировки падения слоев (а) и флюидальности (б); 26 – местонахождения находок ископаемых растений (а) и места отбора проб для спорово-пыльцевого анализа (б); 27 – пункты отбора проб на радиоизотопный анализ и их номера*

***Fig. 1.*** *Geographic location of the object under study (A); geological sketch map of the eastern sector of the Khasan depression (B); scheme of geological structure of the extrusive rhyolites of the Kraskinsky complex and the Khasan formation (C); geological structure of Novgorodsky Peninsular (D) (after [2] with some modifications and additions). 1 – Quaternary alluvial sediments; 2, 3 – lower (2) and upper (3) units of the Fatashinskaya formation (ft); 4 – Eocene volcanoclastic sedimentary rocks of the Khasan formation (hs); 5 – Eocene volcanoclastic sedimentary rocks of the Nazimova formation (nz); 6 – unbroken Eocene volcanogenic formations; 7–13 – Eocene effusive rocks of the Kraskinsky complex (kr): 7 – altered perlites; 8 – rhyolitic glasses; 9 – rhyolites with fluidal texture, 10 – rhyolitic clastolavas, 11 – dykes of rhyolite and dacite, 12 – rhyolitic tuffs, 13 – eruptive breccias; 14 – rhyolitic tuffs of Novoposietskaya formation; 15 – andesite; 16 – andesidacite; 17 – lower Cretaceous deposits of the Gladkinskaya formation; 18, 19 – Permian granites (18) and diorites (19); 20 – metamorphic basement rocks; 21 – quartz veinlets and their attitude parameters; 22 – tectonic faults (a) and shatter zones (b); 23 – established (a) and potential (b) faults; 24 – facies boundaries between andesites and andesidacites; 25 – orientations of beds' dip (a) and lava flow (b); 26 – sites of fossilized flora (a) and sampling for sporo-pollen analysis (b); 27 – points of sampling for radioisotopic analysis and sample numbers*

Тем не менее после публикации предложенная стратиграфическая схема вызвала весьма скептическое отношение к ней вплоть до отвержения со стороны многих геологов на региональном уровне обсуждения. Это вполне понятно, ибо прежняя схема, несмотря на всю ее противоречивость, неизменно считалась безальтернативной на протяжении многих десятилетий. Таким образом, в настоящей работе представлены первые результаты U-Pb-датирования (LA-ICP-MS методом по цирконам) отложений из стратотипа назимовской свиты на п-ове Посьет и гипостратотипа хасанской свиты (северный сектор побережья бухты Экспедиции), а также риолитов краскинского комплекса, позволяющие устранить существующие расхождения во взглядах на их возраст.

На сегодняшний день в геологической литературе при описании одних и тех же кайнозойских отложений юго-западного Приморья нередко используются разные названия одних и тех же свит, что вносит определенную путаницу и мешает читателям правильно воспринимать опубликованный материал. Аналогичная ситуация наблюдается также и в отношении некоторых тектонических структур. В этой связи авторы статьи посчитали необходимым уточнить, что здесь и далее при анализе полученных результатов они будут максимально придерживаться первоначальных названий свит и их ареалов, закрепленных в официально принятой стратиграфической схеме кайнозойских отложений юга Дальнего Востока [4].

### Методы и объекты исследования

Основными объектами наших изотопно-геохронологических исследований (U-Pb метод датирования) стали цирконы из песчаников хасанской (проба Ча-2768/2) и назимовской свит (проба Ча-2772/1), развитых в пределах Хасанской впадины. Кроме того, было выполнено U-Pb-датирование цирконов из риолитов краскинского комплекса (проба 1314), поскольку последние могли быть наиболее вероятным источником поступления молодых цирконов в песчаники вышеназванных свит. Места отбора проб указаны на рис. 1.

Выделение кристаллов циркона из изученных пород осуществлялось по стандартной методике с использованием магнитного сепаратора и тяжелых жидкостей. Затем из образцов вручную под бинокуляром был осуществлен отбор зерен циркона, которые помещались в эпоксидную смолу и полировались с использованием алмазных паст (9 и 1 μm). В дальнейшем с помощью электронного микрозонда JXA-8100, оснащенного катодолюминесцентным детектором, было выполнено изучение зональности и внутренней структуры полированных цирконов, а также выбраны точки для проведения изотопных измерений. Следует отметить, что U-Pb-изотопные исследования цирконов были проведены LA-ICP-MS-методом в разных лабораториях.

Так, выбранные для U-Pb-датированиия кристаллы циркона из пробы песчаников хасанской свиты были изучены в лаборатории аналитической химии ДВГИ ДВО РАН (г. Владивосток) на масс-спектрометре с индуктивно связанной плазмой Agilent 7500a, соединенном с системой лазерной абляции пробы UP-213. Основные особенности методики описаны в работе [8]. Одновременно методом лазерной абляции (LA-SF-ICP-MS) проводилось U-Pb датирование цирконов из пробы песчаников назимовской свиты в ЦКП «Геоспектр» Геологического института СО РАН (г. Улан-Удэ) по методике, изложенной ранее [9]. Изотопное исследование цирконов из риолитов краскинского комплекса осуществлялось с применением метода лазерной абляции ICP-MS в Национальном музее Геологии и Палеонтологии (г. Цукуба, Япония) по методике, принятой в [10].

В процессе исследований из каждого образца было датировано от 16 до 70 кристаллов циркона. Причем возраст проанализированных кристаллов, как правило, распределен в довольно широком диапазоне. Для наших исследований наибольший интерес представляют датировки наиболее молодой популяции цирконов, поскольку возраст вмещающих отложений, естественно, не может быть древнее этой группы.

### Результаты и их обсуждение

Как отмечалось ранее, возраст образований назимовской и хасанской свит основан преимущественно на результатах изучения комплекса растительных остатков в разрезах осадочных пород. Радиоизотопное датирование вышеперечисленных стратонов не осуществлялось, что не позволяет обосновать возрастной диапазон их формирования. В этой связи был выполнен анализ U-Pb-датирования цирконов, выделенных из представительных проб песчаников из стратотипических разрезов назимовской и хасанской свит (п-ов Посьет и северное побережье бухты Экспедиции соответственно).

*Назимовская свита.* Для U-Pb геохронологических исследований цирконов отобран образец среднезернистых песчаников из нижней части стратотипического разреза назимовской свиты, обнажающейся в береговых обрывах северной стороны мыса Тироль. Из пробы выделено 50 кристаллов, которые были проанализированы LA-SF-ICP-MS-методом в лаборатории Геологического института СО РАН (г. Улан-Удэ). Изотопное исследование показало, что в изученном образце присутствуют четыре разновозрастные популяции цирконов, отвечающие интервалам (млн лет) 262–267, 243–250, 203–210 и 37–46.

Наиболее древняя популяция цирконов, имеющая пермский возраст (262–267 млн лет), представлена идиоморфными кристаллами длиннопризматического, реже короткопризматического облика, размером ~300 μm. Катодолюминесцентное изображение этих цирконов показывает, что некоторые из них обладают хорошо выраженной зональностью. Величина Th/U-отношения варьирует в них в довольно узком диапазоне от 0,46 до 0,50.

Цирконы раннетриасового возраста (243–250 млн лет) по морфологии и внутреннему строению кристаллов практически не отличаются от цирконов позднетриасового возраста, но имеют при этом более низкие значения Th/U-отношения – 0,33–0,54.

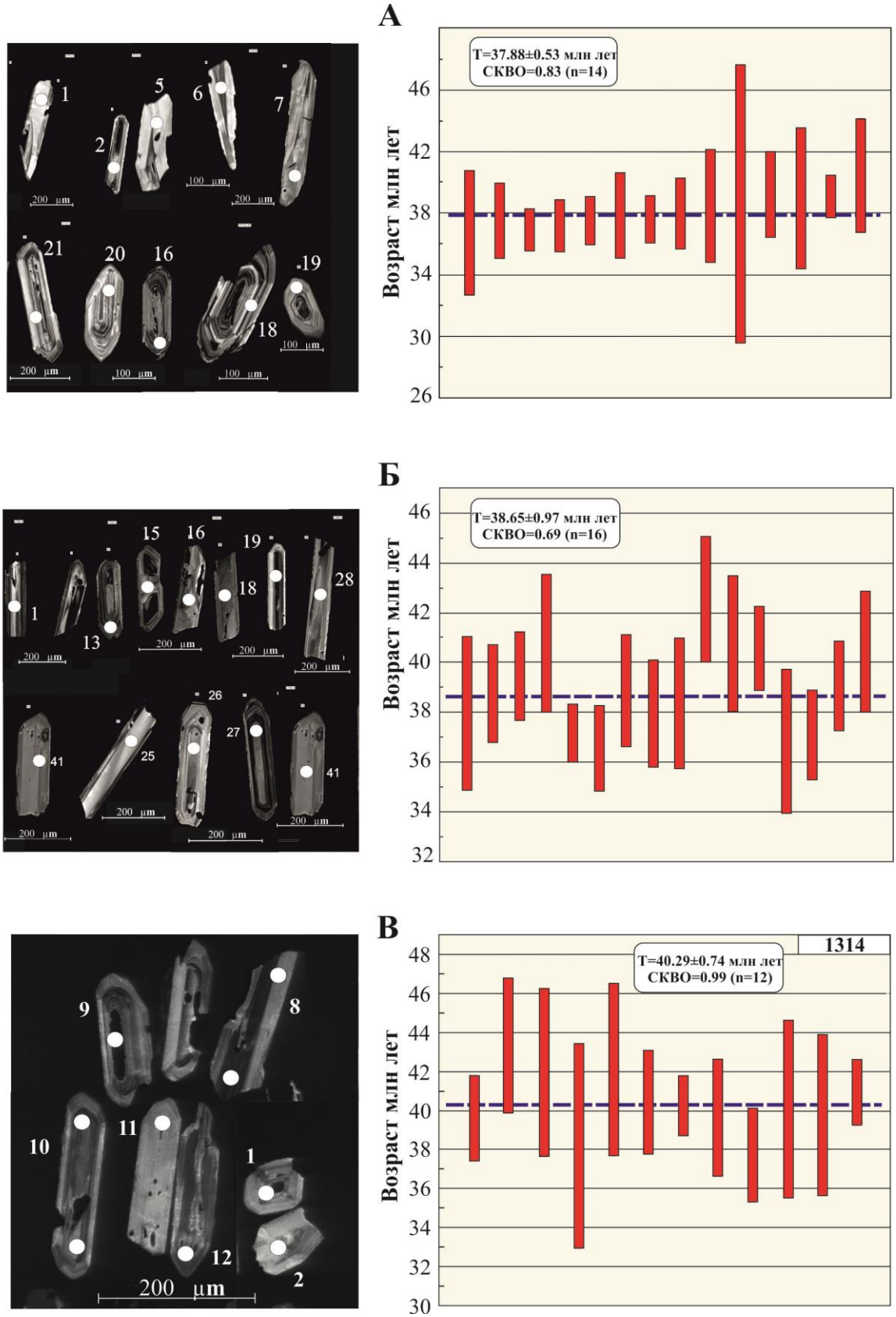



***Рис. 2.*** *Катодолюминесцентные изображения и диаграммы средневзвешенных возрастов для цирконов из пород Хасанской впадины: А) из песчаника назимовской свиты (обр. Ча- 2772/1); Б) из песчаника хасанской свиты (обр. Ча-2768/2); В) из риолита краскинского комплекса (обр. 1314)*

***Fig. 2.*** *Cathodoluminescence images of zircons and diagrams of the weighted average ages of zircons from rocks of the Khasan depression: A) sandstones of the Nasimova formation (smpl. Ча-2772/1); Б) sandstones of the Khasan formation (smpl. Ча-2768/2); B) rhyoloites of the Kraskinsky comples (smpl. 1314)*

Следующая возрастная популяция цирконов, имеющая позднетриасовый возраст (203–210 млн лет), представлена четырьмя кристаллами удлиненно призматической формы размером ~100–400 μm, имеющими плохо выраженную зональность. Величина Th/U отношения в этих цирконах составила 0,54–1,10. Средневзвешенный возраст, рассчитанный по четырем точкам, составил для них 205,6±7,6 млн лет при СКВО=1,7. Отметим, что возраст этих цирконов близок к диапазону возрастов цирконов (233–204 млн лет) из вулканитов тальминского комплекса, распространенного в южной части Хасанской впадины [11].

Цирконы самой молодой популяции представлены мелкими (~50–250 μm) длиннопризматическими, реже короткопризматическими, прозрачными кристаллами бледно-розовой окраски, а также их обломками. В целом среди изученных цирконов преобладают идиоморфные неокатанные зерна. В катодолюминесцентном излучении отдельные зерна минерала обладают хорошо выраженной тонкой осцилляторной магматической зональностью. Величина Th/U отношения в изученных кристаллах достигает значений 0,47–1,36, типичных для цирконов магматического генезиса. Средневзвешенный изотопный возраст для данной популяции цирконов, рассчитанный по 14 точкам, составил 37,88 ±0,53 млн лет при (СКВО=1,7), что соответствует примерно границе средний/поздний эоцен по Международной Стратиграфической Шкале (МСШ). Таким образом, возраст песчаников назимовской свиты, вмещающей данные цирконы, не может быть существенно древнее позднего эоцена. Это значительно расходится с оценкой времени формирования назимовской свиты (поздний палеоцен – ранний эоцен), закрепленным в [4] и принятым при геологосъемочных работах (ГДП-200) [12].

*Хасанская свита.* Для проведения геохронологического исследования взята объемная проба среднезернистых песчаников из нижней части разреза хасанской свиты, обнажающейся в береговых обрывах бухты Экспедиции, вблизи устья р. Гладкой. Из пробы выделено 26 кристаллов циркона, U-Pb-датирование которых проводилось LA-ICP-MS-методом в лаборатории аналитической химии ДВГИ РАН.

В процессе исследования была выявлена всего одна возрастная популяция цирконов, имеющая узкий разброс индивидуальных дат – от 37 до 46 млн лет. Цирконы представляют собой прозрачные кристаллы хорошей сохранности, имеющие длиннопризматический, реже короткопризматический, облик с размером по длинной оси от 100 до 400 μm. У отдельных индивидов просматривается хорошо выраженная тонкая осцилляторная зональность. Величина Th/U-отношения в изученных цирконах варьирует от 0,70 до 1,9. Средневзвешенный изотопный возраст цирконов хасанских песчаников, рассчитанный по 16 кристаллам, составляет 38,65±0,97 млн лет (СКВО=0,69), что соответствует нижнему пределу времени завершения осадконакопления. Этот результат вполне согласуется с оценкой возраста отложений назимовской и хасанской свит, по палеоботаническим данным (не древнее позднего эоцена) [6].

Что касается верхнего возрастного предела обеих свит, то необходимо указать, что возраст глинисто-туффитовой толщи (=фаташинской свиты), перекрывающей без видимого несогласия и стратиграфического перерыва хасанскую свиту, отвечает раннему олигоцену (ранний рюпель) на основании детально изученной флоры Краскино, содержащей уникальный комплекс растений узкого стратиграфического диапазона [7]. Ее аналоги изучены на территории севера Кореи (флора Kungshim) и Японии. Так, на северо-востоке о-ва Хоккайдо ей соответствует флора Wakamatsuzawa. Возраст дацитов из одноименной формации – 31,4 и 32,6 млн лет (K-Ar метод), при том что возраст нижних слоев подстилающей угленосной формации Harutori – 38,6 млн лет (метод треков) [13, 14]. На территории США, в Орегоне, уровню флоры Краскино отвечает флора Bridge Creek. Для соответствующей формации John Day получены даты 32,2 и 33,6 млн лет ($^{40}$Ar-$^{39}$Ar метод) [15]. Близкие по составу палеофлоры и спорово-пыльцевые спектры описаны для раннего олигоцена в Южном и Юго-Западном Китае [16, 17]. Следовательно, верхний возрастной уровень хасанской свиты соответствует примерно эоцен/олигоценовой границе.

Как отмечалось выше, выполненное ранее палинологическое изучение хасанской и назимовской свит по разрезам, приуроченным к двум секторам впадины – южному (п-ов Посьет, скв. 40) и северному (устье р. Гладкая, скв. 129), указывает на таксономическое и композиционное сходство спорово-пыльцевых спектров из обоих разрезов [6]. В них преобладают покрытосеменные (55–75 %) над голосеменными (20–45 %) при незначительной роли спор (менее 10 % с абсолютным доминированием кочедыжниковых).

В группе голосеменных ведущее место занимают таксодиевые (15–25 %) при подчиненной роли сосновых, в которых преобладают *Pinus* subg. *Haploxylon* и *P.* subg. *Diploxylon* (до 25 % в сумме), а также *Picea* sect. *Picea* и *P.* sect. *omorica*. Доля пыльцы елей не превышает 10 %, снижаясь в отдельных пробах до 1,0–1,5 %. Постоянно присутствует *Tsuga*, хотя и в незначительном количестве (1,0–1,5 %). В некоторых пробах изредка отмечается единично пыльца *Ginkgo*, более обычна, но также малочисленна (<1 %) пыльца хвойных южного распространения (*Podocarpus*, *Cedrus*, *Keteleeria*, *Sciadopitys*).

В группе покрытосеменных доминирует (до 30 %) пыльца ильма при незначительном участии других представителей семейства ильмовых (*Zelkova*, *Celtis*). В меньшем количестве (не более 10 %) присутствует пыльца ореховых в т. ч. *Engelhardtia*, березовых (*Betula* spp.), буковых (с преблaдаением *Fagus* spp.) и розоцветных. Весьма показательно участие в спектрах пыльцы гамамелидовых (*Corylopsis*, *Hamamelis*, *Liquidambar*), предположительно вечнозеленых дубов (*Quercus graciliformis*, *Q. conferta*, *Q. forestdalensis*, *Quercites sparsus*), а также формальных таксонов из родов *Triporopollenites*, *Tricolpopollenites*, *Pseudoplicapollis* и некоторых других (палеоботанические определения выполнены Т.И. Петренко). Пе-

речисленные таксоны весьма характерны для эоцена, преимущественно позднего, различных районов Востока Азии [18–22]. На территории Приморья, как уже отмечалось выше, палиноспектры хасанской свиты наиболее близки спектрам из верхнеэоценовой усть-давыдовской свиты в её стратотипе на п-ове Речной (рис. 1) [7].

Из сказанного следует, что назимовская свита на п-ве Новгородский является возрастным и литологическим аналогом хасанской свиты, развитой в северном секторе бухты Экспедиции. Кстати, к выводу о возможном более молодом, чем принято считать в [4], возрасте назимовской свиты, пришел и А.В. Можеровский, по результатам литологических исследований, отметивший, что песчаники назимовской свиты могут отвечать возрастному диапазону 33–23 млн лет [23].

Поскольку по литологическим и палеоботаническим данным хасанская и назимовская свиты однотипны, а возраста цирконов самой молодой популяции в их отложениях близки, можно говорить об одновозрастности этих стратонов. Таким образом, полученные новые радиоизотопные данные подтверждают предложенную в [7] схему последовательности формирования кайнозойского комплекса Хасанской впадины (рис. 3).

Обращает на себя внимания тот факт, что кристаллы циркона обеих свит близки между собой не только по возрасту, но и по морфологическим признакам, что указывает на их вероятное поступление в изученные песчаники из общих источников сноса. Учитывая, что цирконы молодой популяции обеих свит являются магматическими, а их кристаллы имеют хорошо сохранившуюся кристаллографическую форму, что типично для минералов, не испытавших значительного переноса и поступивших в осадок достаточно быстро после своей кристаллизации, логично предположить, что их присутствие связано с вулканизмом, который проявился синхронно с формированием изученных свит или несколько им предшествовал. Действительно, согласно существующим представлениям [2], в этот же период времени (в позднем эоцене – раннем олигоцене) в пределах Хасанской впадины образуется бимодальная базальт-риолитовая серия, представленная зайсановскими базальтами и андезитами, а также краскинскими риолитами и их туфами. Вероятно, что именно кислые эффузивы краскинского комплекса могли быть основным источником поступления цирконов молодой популяции в хасанские и назимовские песчаники.

Для определения времени формирования кислых пород краскинского комплекса нами была отобрана проба кластолав риолитового состава из береговых обнажений в северной части бухты Экспедиции (рис. 1, В). Следует отметить, что по результатам бурения (рис. 1, Б, скв. 51) и наблюдениям в береговых обнажениях рассматриваемый комплекс перекрывается здесь флористически охарактеризованными слоями хасанской свиты. В дальнейшем из данной пробы было выделено 30 зерен, которые затем были использованы для U-Pb-датирования, выполненного в лаборатории Национального музея Геологии и Палеонтологии г. Цукуба (Япония) с применением метода лазерной абляции ICP-MS. В результате проведенных исследований выявлены две популяции цирконов с диапазонами возрастов 38–44 и 52–60 млн лет.

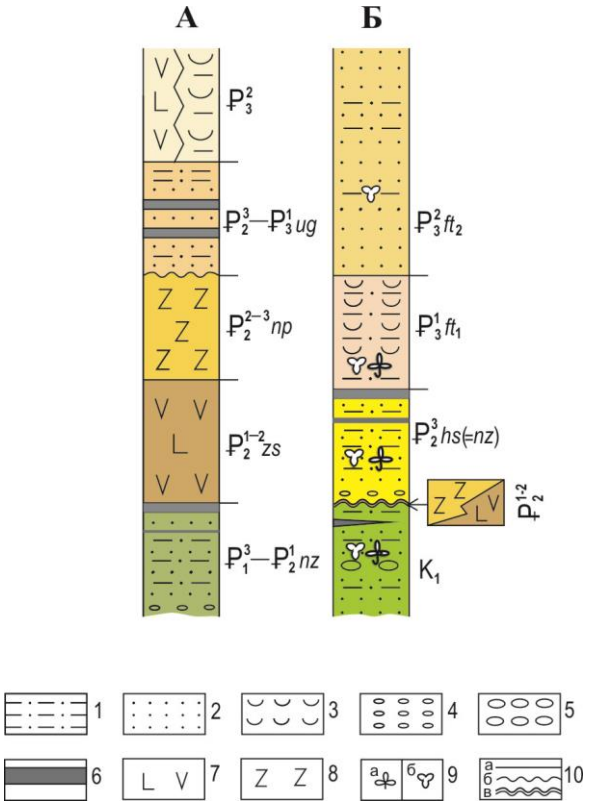



***Рис. 3.*** *Литолого-стратиграфические колонки кайнозойских образований Хасанской впадины: согласно официально принятой схеме [4] (А) и предлагаемая авторами (Б). Стратифицированные образования – свиты: назимовская (nz), хасанская (hs), зайсановская (zs), новопосьетская (np), угловская (ug), фаташинская (ft); 1 – алевролит, 2 – песчаник, 3 – туффит, 4 – гравийник, 5 – конгломерат, 6 – уголь бурый, 7 – лавы, туфы базальтов, андезитов, 8 – лавы, туфы дацитов, риолитов, 9 – местонахождения макрофоссилий (а), проб для спорово-пыльцевого анализа (б), 10 – границы: согласные (а), несогласий (б); стратиграфические перерывы (в)*

***Fig. 3.*** *Lithologostratigraphic columns of the Cenozoic sequences of the Khasan depression: according to the officially adopted scheme [4] (A), the authors' proposition (Б). Stratified formations: Nazimova (nz), Khasan (hs), Zaisanovskaya (zs), Novoposyetskaya (np), Uglovskaya (ug), Fatashinskaya (ft); 1 – siltstone, 2 – sandstone, 3 – tuffite, 4 – gravel deposit, 5 – conglomerate, 6 – brown coal, 7 – lava, basaltic tuff, andesite, 8 – lava, dacitic and rhyolitic tuffs, 9 – locations of microfossils (a), samples for sporo-pollen analysis (б), 10 – boundaries: conformity (a), unconformity (б), stratigraphic gaps (в)*

Цирконы наиболее многочисленной молодой возрастной популяции (38–44 млн лет) представлены преимущественно удлиненно призматическими кри-

сталлами размером от 70 до 350 μm. Отметим, что по своей морфологии они аналогичны цирконам молодой популяции из песчаников выше описанных свит. Величина Th/U отношение варьирует в них в довольно широком диапазоне – от 0,69 до 1,89. В катодолюминесцентном излучении в отдельных зернах наблюдается хорошо выраженная осцилляторная зональность. Средневзвешенная возрастная датировка цирконов этой популяции по результатам LA- ICP-MS составляет 40,3±0,7 млн лет (по данным девяти точек) при величине СКВО=0,99. Отметим, что данная U-Pb-датировка близка возрасту – 36,7±1,4 млн лет, полученному ранее K-Ar методом для дайки вулканического стекла риолитового состава, закартированой в бассейне р. Виноградная (приток р. Гладкой), в типовой местности краскинского комплекса [24]. Таким образом, породы краскинского комплекса имеют средне-позднеэоценовый возраст.

Кристаллы циркона второй популяции встречаются преимущественно в виде небольших обломков (50–100 μm) короткопризматических кристаллов со слабо сглаженными формами, реже отмечаются идиоморфные кристаллы. Последние имеют слабо выраженную осцилляторную зональность. Величина Th/U-отношения в цирконах этой популяции варьируют в интервале 0,40–1,28. В целом подобные характеристики свойственны цирконам магматического происхождения. Средневзвешенный возраст, рассчитанный для цирконов данной популяции по восьми точкам измерений (шесть зерен), составляет 55,47±2,5 млн лет при величине СКВО=3,2. Вероятней всего, эти цирконы попали в риолитовый расплав из ксеногенных обломков «рамы», захваченных в процессе его подъема к поверхности.

Исходя из полученных U-Pb изотопно-геохронологические данных, можно обоснованно полагать, что именно кислые эффузивы краскинского комплекса поставляли цирконы средне-позднеэоценового возраста в песчаники ранее считавшихся разновозрастными назимовской и хасанской свит.

**Заключение**

Возраст самой молодой популяции цирконов в песчаниках назимовской и хасанской свит, согласно данным U-Pb-датирования, составляет 37–38 млн лет, что соответствует позднему эоцену в пределах допуска и совпадает с возрастной оценкой формирования этих свит, полученной ранее по результатам изучения микро- и макрофлоры. Соответственно, отложения назимовской свиты, локально распространенные на п-ове Новгородский, и отложения хасанской свиты, развитые на остальной территории Хасанской впадины, являются одновозрастными образованиями. Следовательно, в пределах Хасанской депрессии в кайнозое был один, позднеэоценовый, этап углеобразования, а не два, как считалось ранее. Ему соответствует формирование хасанской (=назимовской) свиты.

Учитывая магматическую природу изученных цирконов, а также их морфологические особенности, можно предположить, что поступление цирконов самой молодой популяции в песчаники хасанской (=назимовской) свиты связано с размывом верхнеэоценовых кислых пород краскинского комплекса.

Таким образом, результаты радиоизотопного датирования могут быть использованы в качестве решающего дополнительного аргумента в случае принципиальных расхождений в оценке возраста ключевых стратонов, определяющих архитектуру РСС. В нашем случае речь идет о хасанской (=назимовской) свите. Имеющиеся два варианта ее положения в МСШ – официально принятый [4] и предложенный авторами – отражены в литолого-стратиграфических колонках (рис. 3). Полученные датировки свидетельствуют в пользу второго варианта. Легко видеть, насколько он упрощает РСС применительно к Хасанской впадине и ее аналогам по геологическому строению в других впадинах Приморья (Павловка, Реттиховка, Демби и др.) и в соседних регионах юга Дальнего Востока России.

*Исследование выполнено при финансовой поддержке РФФИ (гранты № 21-55-53013 ГФЕН_а и № 19-05-00229А).*

**СПИСОК ЛИТЕРАТУРЫ**

1. The plant biostratigraphy of the Cenozoic coal-bearing formations in Primorye, Russian Far East / B.I. Pavlyutkin, T.I. Petrenko, I.Y. Chekryzhov, V.P. Nechaev, T.A. Moore // International Journal of Coal Geology. – 2020. – V. 220. – № 103414. – P. 1–21.
2. Попов В.К., Чащин А.А. Кайнозойский вулканизм рифтогенных впадин юго-западного Приморья. – Владивосток: Дальнаука, 2016. – 63 с.
3. Решения Межведомственного совещания по выработке унифицированных стратиграфических схем для Дальнего Востока. – М.: Госгеолтехиздат, 1958. – 51 с.
4. Решения 4-го Межведомственного стратигрфического совещания по докембрию и фанерозою юга Дальнего Востока и Забайкалья (Хабаровск, 1990 г.). – Хабаровск, 1994. – 124 с.
5. Маркевич В.С. Альбская палинофлора Приморья // Эволюция организмов и биостратиграфия середины мелового периода. – Владивосток: ДВНЦ АН СССР, 1981. – С. 116–129.
6. О возрасте палеогеновых назимовской и хасанской свит Юго-Западного Приморья / Б.И. Павлюткин, С.И. Неволина, Т.И. Петренко, Т.К. Кутуб-Заде // Стратиграфия. Геол. корреляция. – 2006. – Т. 14. – № 3. – С. 108–121.
7. Павлюткин Б.И., Петренко Т.И. Стратиграфия палеоген-неогеновых отложений Приморья. – Владивосток: Дальнаука, 2010. – 164 с.
8. The application of laser ablation-inductively coupled plasma-mass spectrometry to in situ U/Pb zircon geochronology / S.E. Jackson, N.J. Pearson, W.L. Griffin, E.A. Belousova // Chemical Geology – 2004. – V. 211. – P. 47–69.
9. Хубанов В.Б., Буянтуев М.Д., Цыганков А.А. U-Pb изотопное датирование цирконов из PZ3-MZ магматических комплексов Забайкалья методом магнитно-секторной масс-спектрометрии с лазерным пробоотбором: процедура определения и сопоставление с SHRIMP данными // Геология и геофизика. – 2016. – Т. 57. – № 1. – С. 241–258.
10. LA-ICP- MS and SHRIMP age of zircons in chevkinite and monazite tuffs from the Boso Peninsula, Central Japan / Y. Tsutsumi, K. Horie, T. Sano, R. Miyawaki, K. Momma, S. Matsubara, M. Shigeoka, K. Yokoyama // Bulletin of the National Museum of Nature and Science. Series C, Geology & Paleontology. – 2012. – V. 38. – P. 15–32.
11. Новые результаты минералого-геохимических и изотопно-геохронологических исследований триасового вулканизма южного Приморья (на примере изучения Тальминской вулканоструктуры) / С.А. Чащин, В.К. Попов, А.А. Чащин, С.Ю. Будницкий // IX Сибирская конференция молодых ученых по наукам о Земле. – Новосибирск, 2018. – С. 673–676.
12. Государственная геологическая карта Российской Федерации. Масштаб 1:200000. Серия Ханкайская. Листы K-52-XI, XVII.

Объяснительная записка / под ред. Н.К. Цесарского. – М.: МФ ВСЕГЕИ, 2013. – 144 с.
13. Tanai T. Euphorbiaceae and Icacinaceae from the Paleogene of Hokkaido, Japan // Bulletin of the National Museum of Nature and Science. Series C, Geology & Paleontology. – 1990. – V. 16. – № 3. – P. 91–118.
14. Oligocene–Neogene fossil history of Asian endemic conifer genera in Japan and Korea / A. Yabe, E. Jeong, K. Kim, K. Uemura // Journal of Systematics and Evolution. – 2019. – V. 57. – № 2. – P. 114–128.
15. Meyer H.W., Manchester S.R. The Oligocene Bridge Creek Flora of the John Day Formation, Oregon // University of California publications in geological sciences. – 1997. – V. 141. – 270 p.
16. Oligocene plant ecological strategies in low-latitude Asia unraveled by leaf economics / Q. Li, T. Su, Y.C. Liu, C. Quan // Journal of Asian Earth Sciences. – 2019. – V. 182. – № 103933. – P. 1–10.
17. Early Oligocene vegetation and climate of southwestern China inferred from palynology / H. Tang, S.-F. Li, T. Su, R.A. Spice, S.-T. Zhang, S.-H. Li, J. Liu, V. Lauretano, C.R. Witkowski, T.E.V. Spicer, W.-Y.-D. Deng, M.-X. Wu, W.-N. Ding, Z.-K. Zhou // Palaeogeography, Palaeoclimatology, Palaeoecology. – 2020. – V. 560. – № 109988. – P. 1–10.
18. Бойцова Е.П., Панова Л.А. Палеогеновые флоры и растительность на территории Евразийской ботанико-географической области // Палинология кайнофита. – М.: Наука, 1973. – С. 42–47.
19. Climatic change during the Palaeocene to Eocene based on fossil plants from Fushun, China / Q. Wang, D.K. Ferguson, G.-P. Feng, A.G. Ablaev, Y.-F. Wang, J. Yang, Y.-L. Li, C.-S. Li // Palaeogeography, Palaeoclimatology, Palaeoecology. – 2010. – V. 295. – P. 323–331.
20. Quantitative reconstruction of Middle and Late Eocene paleoclimate based on palynological records from the Huadian Basin, northeastern China: Evidence for monsoonal influence on oil shale formation / Q.-t. Meng, A.A. Bruch, G. Sun, Z.-j. Liu, F. Hu, P.-c. Sun // Palaeogeography, Palaeoclimatology, Palaeoecology. – 2018. – V. 510. – P. 63–77.
21. Zhao Y. Vegetation and climate reconstructions on different time scales in China: a review of Chinese palynological research // Vegetation History and Archaeobotany. – 2018. – V. 27. – P. 381–392.
22. The Na Duong Basin (North Vietnam): a key for understanding Paleogene basin evolution in relation to the left-lateral Cao Bang-Tien Yen Fault / A. Wysocka, P.D. Pha, E. Durska, U. Czarniecka, D.V. Thang, A. Filipek, N.Q. Cuong, D.M. Tuan, N.X. Huyen, H.V. Tha, R. Staniszewski // Journal of Asian Earth Sciences. – 2020. – V. 195. – № 104350. – P. 1–20.
23. Можеровский А.В. Геология и стратиграфия полуострова Посьет (Южное Приморье) с минералогической точки зрения // Вестник КРАУНЦ. Науки о Земле. – 2019. – Т. 43. – № 3. – С. 26–37.
24. Петролого-геохимическая характеристика вулканических кайнозойских комплексов Краскинской впадины на примере п-ва Краббе (Приморье) / В.К. Попов, А.В. Гребенников, С.В. Коваленко, Т.К. Кутуб-Заде // Мезозойские и кайнозойские магматические и метаморфические образования Дальнего Востока: материалы V Дальневосточного регионального петрографического совещания. – Хабаровск: ФГУГГП «Хабаровскгеология», 2001. – С. 38–40.

*Поступила: 01.12.2021 г.*

**Информация об авторах**

***Чащин А.А.***, кандидат геолого-минералогических наук, старший научный сотрудник лаборатории геохимии Дальневосточного геологического института ДВО РАН.

***Павлюткин Б.И.***, доктор геолого-минералогических наук, ведущий научный сотрудник лаборатории региональной геологии и тектоники Дальневосточного геологического института ДВО РАН.

***Чекрыжов И.Ю.***, научный сотрудник лаборатории геохимии Дальневосточного геологического института ДВО РАН.

***Хубанов В.Б.***, кандидат геолого-минералогических наук, заведующий лабораторией геохронологии и геохимии окружающей среды Геологического института СО РАН.

***Цуцуми Ю.***, исследователь Департамента геологии и палеонтологии Национального музея природы и науки.

***Чащин С.А.***, младший научный сотрудник лаборатории геохимии Дальневосточного геологического института ДВО РАН.

UDC 551.77, 550.93, 621.039.86

# NEW DATA ON THE AGE OF COAL-BEARING STRATA IN THE SOUTHWESTERN PRIMORYE AND THEIR SIGNIFICANCE FOR CENOZOIC STRATIGRAPHY OF THE FAR EAST

**Aleksandr A. Chashchin**[1],
achashchin@mail.ru

**Boris I. Pavlyutkin**[1],
pavlyutkin@fegi.ru

**Igor Yu. Chekryzhov**[1],
chekr2004@mail.ru

**Valentin B. Khubanov**[2],
khubanov@mail.ru

**Yukiyasu Tsutsumi**[3],
ytsutsu@kahaku.go.jp

**Sergey A. Chashchin**[1],
s.cha@fegi.ru

[1] Far East Geological Institute FEB RAS,
159, Prospekt 100-letiya, Vladivostok, 690022, Russia.

[2] Geological Institute SB RAS,
6a, Sakhyanova street, Ulan-Ude, 670047, Russia.

[3] National Museum of Nature and Science,
4-1-1 Amakubo, Tsukuba, Ibaraki, 305-0005, Japan.

***The relevance*** *of the research is conditioned by the need to eliminate the existing division of opinions about the age of the commercially coal-bearing Paleogene deposits in the southwestern Primorye and neighboring territories.*
***The main objective*** *is to carry out U-Pb analysis of zircons from the Tertiary rocks within the Khasan rift valley for later use of these data in specifying the order of formation of the rocks.*
***Objects:*** *sedimentary rocks of the Khasan and Nasimova formations, rhyolites of the Kraskinsky complex.*
***Methods:*** *study on zircon internal zoning and structure with the help of cathodoluminescence detector-equipped JXA-8100 electron microprobe, U-Pb dating of zircons by LA-ICP-MS.*
***Results.*** *The age of 37–38 Ma was determined for the zircons from sandstones of the Nasimova and Khasan formations. This age corresponds to the late Eocene and coincides with the age estimation of these sequences formation inferred from the previous studies on micro- and macroflora. Is has been established that the supply of the youngest population of zircons to the sandstones was due to erosion of the upper Eocene acid rocks of the Kraskinsky complex. This allows a suggestion about the uniformity of age for the above-mentioned stratigraphic units and the existence of one rather than two, as previously believed, stages of coalification in the Cenozoic within the Khasan rift valley. The new data thus considerably simplify regional stratigraphic scale as applied to the Khasan depression and its analogues in Primorye and neighboring regions.*

***Key words:***
*U-Pb dating of zircons, Cenozoic, Khasan depression, southwestern Primorye, coal-bearing strata, stratigraphy.*

*The research was financially supported by the RFBR (grants no. 21-55-53013 ГФЕН_а, 19-05-00229А).*

## REFERENCES

1. Pavlyutkin B.I., Petrenko T.I., Chekryzhov I.Y., Nechaev V.P., Moore T.A. The plant biostratigraphy of the Cenozoic coal-bearing formations in Primorye, Russian Far East. *International Journal of Coal Geology*, 2020, vol. 220, no. 103414, pp. 1–21.
2. Popov V.K., Chashchin A.A. *Kaynozoyskiy vulkanizm riftogennykh vpadin yugo-zapadnogo Primorya* [Cenozoic volcanism within rift valleys of the southwestern Primorye]. Vladivostok, Dalnauka Publ., 2016. 63 p.
3. *Resheniya Mezhvedomstvennogo soveshchaniya po vyrabotke unifitsirovannykh stratigraficheskikh skhem dlya Dalnego Vostoka* [Decisions of Inter-Agency Meeting for the development of uniform stratigraphic schemes for the Russian Far East]. Moscow, Gosgeoltekhizdat Publ., 1958. 51 p.
4. *Resheniya 4-go Mezhvedomstvennogo stratigrficheskogo soveshchaniya po dokembriyu i fanerozoyu yuga Dalnego Vostoka i Zabaykalya* [Decisions of the 4th Inter-Agency Stratigraphic Meeting on Precambrian and Phanerozoic evolution of the south of Far East and Transbaikalia]. Khabarovsk, 1994. 124 p.
5. Markevitch V.S. Albskaya palinoflora Primorya [Albian palynoflora of Primorve]. *Evolyutsiya organizmov i biostratigrafiya serediny melovogo perioda* [Organic evolution and biostratigraphy in the middle of the Cretaceous Period]. Vladivostok, SA USSR Publ., 1981. pp. 116–129.
6. Pavlyutkin B.I., Nevolina S.I., Petrenko T.I., Kutub-Zade T.K. O vozraste paleogenovykh nazimovskoy i khasanskoy svit Yugo-Zapadnogo Primorya [About the age of the Paleogene Nazomova and Khasan formations in the southwestern Primorye]. *Stratigrafiya. Geol. Korrelyatsiya*, 2006, vol. 14, no. 3, pp. 108–121.

7. Pavlyutkin B.I., Petrenko T.I. *Stratigrafiya paleogen-neogenovykh otlozheniy Primorya* [Stratigraphy of Paleogene–Neogene sediments in Primorye]. Vladivostok, Dalnauka Publ., 2010. 164 p.
8. Jackson S.E., Pearson N. J., Griffin W.L., Belousova E.A. The application of laser ablation-inductively coupled plasma-mass spectrometry to in situ U/Pb zircon geochronology. *Chemical Geology*, 2004, vol. 211, pp. 47–69.
9. Khubanov V.B., Buyantuev M.D., Tsygankov A.A. U-PB dating of zircons from $PZ_3$-MZ igneous complexes of Transbaikalia by sector-field mass spectrometry with laser sampling: technique and comparison with SHRIMP. *Russian Geology and Geophysics*, 2016, vol. 57, no. 1, pp. 190–205. In Rus.
10. Tsutsumi Y., Horie K., Sano T., Miyawaki R., Momma K., Matsubara S., Shigeoka M., Yokoyama K. LA-ICP-MS and SHRIMP age of zircons in chevkinite and monazite tuffs from the Boso Peninsula, Central Japan. *Bulletin of the National Museum of Nature and Science. Series C, Geology & Paleontology*, 2012, vol. 38, pp. 15–32.
11. Chashchin S.A., Popov V.K., Chashchin A.A., Budnitskiy S.Yu. Novye rezultaty mineralogo-geokhimicheskikh i izotopno-geokhronologicheskikh issledovaniy triasovogo vulkanizma yuzhnogo Primorya (na primere izucheniya Talminskoy vulkanostruktury) [New results of mineralogical, geochemical and isotopegeochronological study of triassic volcanism in South Primorye (on the example of Talminsky volcanic structure)]. *IX Sibirskaya konferenciya molodyh uchenyh po naukam o Zemle* [IX Siberian Conference of Young Geoscientists]. Novosibirsk, 2018. pp. 673–676.
12. Gosudarstvennaya geologicheskaya karta Rossiyskoy Federatsii. Masshtab 1:200000. Seriya Khankayskaya. Listy K-52-XI, XVII. Obyasnitelnaya zapiska [State Geological Map of the Russian Federation, scale 1:200000. Khanka Formation. Pages K-52-XI, XVII with Legends]. Ed. by N.K. Tsesarskiy. Moscow, MF VSEGEI Publ., 2013. 144 p.
13. Tanai T. Euphorbiaceae and Icacinaceae from the Paleogene of Hokkaido, Japan. *Bulletin of the National Museum of Nature and Science. Series C, Geology & Paleontology*, 1990, vol. 16, no. 3, pp. 91–118.
14. Yabe A., Jeong E., Kim K., Uemura K. Oligocene–Neogene fossil history of Asian endemic conifer genera in Japan and Korea. *Journal of Systematics and Evolution*, 2019, vol. 57, no. 2, pp. 114–128.
15. Meyer H.W., Manchester S.R. The Oligocene Bridge Creek Flora of the John Day Formation, Oregon. *University of California publications in geological sciences*, 1997, vol. 141, 270 p.
16. Li Q., Su T., Liu Y.C., Quan C. Oligocene plant ecological strategies in low-latitude Asia unraveled by leaf economics. *Journal of Asian Earth Sciences*, 2019, vol. 182, no. 103933, pp. 1–10.
17. Tang H., Li S.-F., Su T., Spice R.A., Zhang S.-T., Li S.-H., Liu J., Lauretano V., Witkowski C.R., Spicer T.E.V., Deng W.-Y.-D., Wu M.-X., Ding W.-N., Zhou Z.-K. Early Oligocene vegetation and climate of southwestern China inferred from palynology. *Palaeogeography, Palaeoclimatology, Palaeoecology*, 2020, vol. 560, no. 109988, pp. 1–10.
18. Boytsova E.P., Panova L.A. Paleogenovye flory i rastitelnost na territorii Evraziyskoy botaniko-geograficheskoy oblasti [Evolution of the Paleogene flora on the territory of Eurasia]. *Palinologiya kajnofita* [Cenophytic Palynology]. Moscow, Nauka Publ., 1973. pp. 42–47.
19. Wang Q., Ferguson D.K., Feng G.-P., Ablaev A.G., Wang Y.-F., Yang J., Li Y.-L., Li C.-S. Climatic change during the Palaeocene to Eocene based on fossil plants from Fushun, China. *Palaeogeography, Palaeoclimatology, Palaeoecology*, 2010, vol. 295, pp. 323–331.
20. Meng Q.-t., Bruch A.A., Sun G., Liu Z.-j., Hu F., Sun P.-c. Quantitative reconstruction of Middle and Late Eocene paleoclimate based on palynological records from the Huadian Basin, northeastern China: Evidence for monsoonal influence on oil shale formation. *Palaeogeography, Palaeoclimatology, Palaeoecology*, 2018, vol. 510, pp. 63–77.
21. Zhao Y. Vegetation and climate reconstructions on different time scales in China: a review of Chinese palynological research. *Vegetation History and Archaeobotany*, 2018, vol. 27, pp. 381–392.
22. Wysocka A., Pha P.D., Durska E., Czarniecka U., Thang D.V., Filipek A., Cuong N.Q., Tuan D.M., Huyen N.X., Tha H.V., Staniszewski R. The Na Duong Basin (North Vietnam): a key for understanding Paleogene basin evolution in relation to the left-lateral Cao Bang-Tien Yen Fault. *Journal of Asian Earth Sciences*, 2020, vol. 195, no. 104350, pp. 1–20.
23. Mozherovsky A.V. Mineralogically based geology and stratigraphy of the Posyet peninsular (Southern Primorye). *Bulletin of Kamchatka Regional Association «Educational-Scientific Center» Earth Sciences*, 2019, vol. 43, no. 3, pp. 26–37. In Rus.
24. Popov V.K., Grebennikov A.V., Kovalenko S.V., Kutub-Zade T.K. Petrologo-geokhimicheskaya kharakteristika vulkanicheskikh kaynozoyskikh kompleksov Kraskinskoy vpadiny na primere p-va Krabbe (Primorye) [Geochemical characteristics of Cenozoic igneous complexes of the Kraskino depression on the example of Krabbe Peninsular (Primorye)]. *Mezozoyskie i kaynozoyskie magmaticheskie i metamorficheskie obrazovaniya Dalnego Vostoka. Materialy V Dalnevostochnogo regionalnogo petrograficheskogo soveshchaniya* [Mesozoic and Cenozoic magmatic and metamorphosed formations of the Far East. Proc. of the V$^{th}$ Far Eastern Regional Petrographic Conference]. Khabarovsk, Khabarovskgeologiya Publ., 2001. pp. 38–40.


*Received: 1 December 2021.*


**Information about the authors**

***Aleksandr A. Chashchin***, Cand. Sc., senior research fellow, Far East Geological Institute FEB RAS.

***Boris I. Pavlyutkin***, Dr. Sc., leading research fellow, Far East Geological Institute FEB RAS.

***Igor Yu. Chekryzhov***, research fellow, Far East Geological Institute FEB RAS.

***Valentin B. Khubanov***, Cand. Sc., head of the laboratory, Geological Institute SB RAS.

***Yukiyasu Tsutsumi***, researcher, National Museum of Nature and Science.

***Sergey A. Chashchin***, junior research fellow, Far East Geological Institute FEB RAS.

УДК 681.5.037

# МОДЕЛИРОВАНИЕ АВТОМАТИЧЕСКОЙ СИСТЕМЫ РЕГУЛИРОВАНИЯ ТЕМПЕРАТУРЫ ПРОЦЕССА СТАБИЛИЗАЦИИ КАТАЛИЗАТА В УСЛОВИЯХ НЕОПРЕДЕЛЕННОСТИ

**Джамбеков Азамат Матифулаевич**[1],
dzhambekovam@yandex.ru

**Дмитриевский Борис Сергеевич**[2],
dmiboris@yandex.ru

[1] Астраханский государственный технический университет,
Россия, 414056, г. Астрахань, ул. Татищева, 16.

[2] Тамбовский государственный технический университет,
Россия, 392000, г. Тамбов, ул. Советская, 106.

***Актуальность*** *работы состоит в необходимости учета влияния возмущений (изменение качества нестабильного катализата, качества топливного газа) на процесс регулирования температуры в нижней части колонны стабилизации блока стабилизации катализата установки каталитического риформинга. Температура низа стабилизационной колонны является важной характеристикой блока стабилизации катализата, показатели которого характеризуют качество функционирования всего комплекса процесса риформинга. Особенность рассматриваемого объекта управления состоит в качественной информации, содержащейся в входных величинах и возмущающих воздействиях, к которым относятся состояние трубчатой печи, содержание бензолообразующих в нестабильном катализате, качество нестабильного катализата, качество топливного газа. Эта информация оценивается операторами на основе опыта технологов, учитывается в виде лингвистических параметров по результатам опроса экспертов и представляется функциями принадлежности. Влияние возмущений предложено рассматривать через параметры передаточной функции системы регулирования на основе методов робастной устойчивости. Предполагается, что данные коэффициенты изменяются с течением времени под влиянием возмущений. При этом важной является задача исследования робастной устойчивости при регулировании температуры.*

***Цель:*** *обеспечение устойчивого режима регулирования температуры колонны стабилизации в условиях неопределенности.*

***Объект:*** *блок стабилизации катализата установки каталитического риформинга с непрерывной регенерацией катализатора.*

***Методы:*** *теория каталитического риформинга, моделирование, теория автоматического управления, системный анализ, вычислительная математика.*

***Результаты.*** *Поставлена и решена задача исследования устойчивости регулирования температуры колонны стабилизации в условиях неопределенности. Приведена характеристика схемы процесса стабилизации катализата. Проанализирован объект управления, переменные распределены в группы как векторы, отмечены особенности объекта управления. Исследована робастная устойчивость, приведены результаты моделирования и определен радиус устойчивости, что позволяет обеспечить устойчивый режим работы автоматической системы регулирования температуры нижней части колонны при неопределенности.*

***Ключевые слова:***
*Процесс риформинга, температура низа колонны, регулирование, передаточная функция, робастная устойчивость, номинальный полином, семейство полиномов.*

## Введение

В [1] выполнено моделирование автоматического системы регулирования (АСР) температуры низа стабилизационной колонны (СК), принадлежащей установке каталитического риформинга (КР), а именно блоку стабилизации катализата (БСК) [2]. Октановое число стабильного катализата (продукта БСК) характеризует качество функционирования всего комплекса процесса риформинга [3]. Для эффективного управления БСК, помимо разработки эффективных алгоритмов управления, обеспечивающих достижение экономического или иного эффекта, необходимо обеспечение устойчивого режима работы АСР технологических параметров (температуры, давления, расхода и пр.). Одним из основных параметров технологического процесса в БСК является температура нижней части колонны стабилизации [4]. На регулирование температуры низа СК оказывают влияние возмущения: изменение качества нестабильного катализата, качества топливного газа [5].

Данные возмущения необходимо учитывать при разработке АСР температуры нижней части СК [6]. В [1] коэффициенты знаменателя в передаточной функции АСР температуры низа СК постоянные. В настоящей работе предложен учет влияния возмущений путем изменения коэффициентов знаменателя в передаточной функции АСР температуры нижней части СК с использованием методов робастной устойчивости [7]. Предполагается, что данные коэффициенты изменяются под влиянием возмущений с течением времени [8]. Важной является задача исследования робастной устойчивости АСР температуры низа СК [9].

Перед описанием постановки задачи приведем краткое описание принципиальной схемы БСК и анализ процесса стабилизации как объекта управления.

## Описание схемы БСК

Из блока КР нестабильный катализат переводится в теплообменник *Т*-1, обогреваемый стабильным, а


DOI 10.18799/24131830/2022/1/3513

затем направляется в колонну стабилизации *C*-3 (рис. 1) [10].

В колонне *C*-3 происходит процесс стабилизации катализата, заключающийся в выводе из верхнего сечения колонны *C*-3 газа стабилизации, нестабильной головки. Далее происходит охлаждение и частичная конденсация газа стабилизации и нестабильной головки в аппарате *H*-3 и *H*-4. Сепарация газа стабилизации, а также нестабильной головки производится в *E*-1 [11].

Газ стабилизации переводится в топливную сеть, жидкая фаза используется для орошения верха *C*-3 [12].

Сбалансированный объем головки стабилизации выводится из емкости *E*-1 с помощью насоса *N*-3 и направляется для осуществления процессов в блоке очистки и выделения сжиженных газов [13].

В теплообменнике *T*-1 происходит теплообмен стабильного катализата, выходящего из нижней части колонны *C*-3, и нестабильного катализата. Стабильный катализат направляется для осуществления процессов в товарном блоке [14].

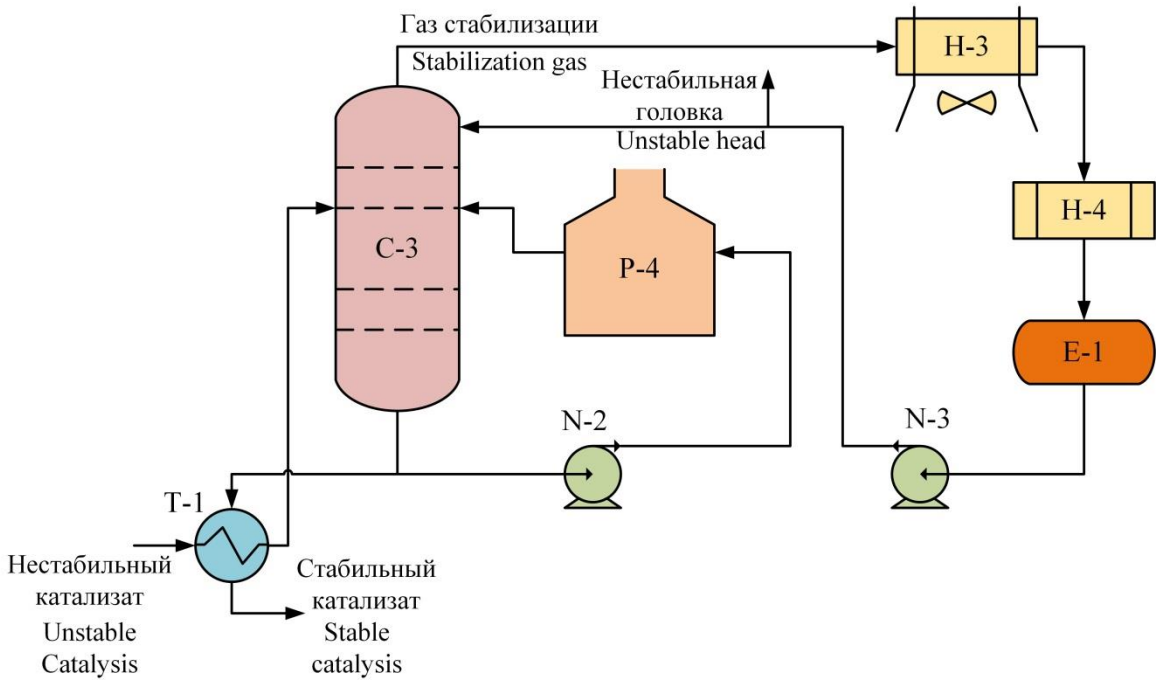



***Рис. 1.*** *Принципиальная схема процесса стабилизации*
***Fig. 1.*** *Schematic diagram of stabilization*

#### Анализ процесса стабилизации как объекта управления

Процесс стабилизации катализата характеризуется набором переменных (входных, выходных), воздействий (управляющих, возмущающих) (рис. 2) [13].

Переменные и воздействия выделены в 4 группы и представлены векторами [14]:

1. Вектор управлений ***U***: сбрасываемый газ стабилизации (объемный расход) $Q_{gs}$; объемный расход топливного газа $Q_{fg}$; объемный расход нестабильного катализата $Q_{uc}$.
2. Вектор возмущений ***V***: качество топливного газа *QFG*; качество нестабильного катализата *QUC*.
3. Вектор входов ***A***: температура нестабильного катализата, измеряемая на входе в колонну стабилизации $T_{in}$; коэффициент, учитывающий избыток воздуха, находящегося в печи α; оценка состояния трубчатой печи *CTF*; оценка содержания в нестабильном катализате бензолообразующих соединений *CBF*; скорость подачи насосом нестабильного катализата $Q_V$.
4. Вектор выходов ***W***: температура стабильного катализата, измеряемая на выходе из колонны стабилизации $T_{out}$; давление в колонне *P*; перепад температуры в колонне Δ*T*; издержки организации процесса *Z*; октановое число стабильного катализата *ON*.

Предполагаем, что выходы не изменяются, если не изменяются входы и управления [15].

Особенность объекта заключается в имеющейся в векторах входов ***A*** и возмущений ***V*** качественной информации: состояние трубчатой печи *CTF*; содержание бензолообразующих в нестабильном катализате *CBF*; качество нестабильного катализата *QUC*; качество топливного газа *QFG*. В [16] предложено определять данную информацию в модели КР как лингвистические переменные (ЛП), учитывая опыт технологов. ЛП оцениваются операторами качественно. Эта информация в результате экспертного опроса формализуется в виде функций принадлежности [17].

#### Постановка задачи

Для исследования робастной устойчивости АСР температуры в нижней части СК рассмотрим схему, которая представлена на рис. 3.

***Рис. 2.*** *Анализ процесса в блоке стабилизации как объекта управления*
***Fig. 2.*** *Analysis of the catalyzate stabilization as a control object*

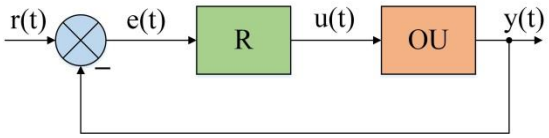



***Рис. 3.*** *Типовая схема регулирования*
***Fig. 3.*** *Typical control scheme*

На рис. 3 используются обозначения: $r(t)$ – задающее воздействие; $e(t)$ – ошибка управления; $u(t)$ – управление; $y(t)$ – выход; $R$ – регулятор (ПИД-регулятор); $OU$ – объект управления (процесс в колонне стабилизации) [15]. Регулируемым параметром $y(t)$ является температура в нижней части СК [16]. Заданием $r(t)$ является ступенчатое изменение положения регулирующего устройства, находящегося на трубопроводе нестабильного катализата в колонну стабилизации [17].

На основе экспериментальной переходной кривой для установки КР Л-35-11/1000 получен общий вид полинома знаменателя передаточной функции АСР температуры низа СК (1).

$$P(s) = a_0 + a_1 s + a_2 s^2, a_i > 0, i = 0,1,2. \qquad (1)$$

Для устойчивости АСР температуры в нижней части СК при воздействии возмущений необходимо определить максимальный размах изменения коэффициентов полинома (1), при котором сохраняется робастная устойчивость, т. е. радиус устойчивости [18]. При изменении коэффициентов полином (1) преобразуется в семейство полиномов (2) знаменателя передаточной функции АСР температуры низа СК.

$$\wp(s) = \left\{ P(s) = a_0 + a_1 s + a_2 s^2 : \left| a_i - a_i^0 \right| \le \gamma \alpha_i, i = 0,1,2 \right\}, \qquad (2)$$

где $a_i^0$ – коэффициенты номинального полинома (1); $\alpha_i \geq 0$ – масштабы изменения коэффициентов $a_i$; $\gamma>0$ – размах неопределенности.

Для определения радиуса устойчивости необходимо ввести функции

$$P_0(j\omega) = U_0(\omega) + j\omega V_0(\omega),$$

$$U_0(\omega) = a_0^0 - a_2^0\omega^2,\ V_0(\omega) = a_1^0,$$

$$R(\omega) = \alpha_0 + \alpha_2\omega^2,\ T(\omega) = \alpha_1$$

и построить годограф Цыпкина–Поляка [19]

$$z(j\omega) = x(\omega) + jy(\omega),$$

$$x(\omega) = \frac{U_0(\omega)}{R(\omega)},\ y(\omega) = \frac{V_0(\omega)}{T(\omega)},\ 0 \leq \omega < \infty \cdot$$

Известно [4], что для робастной устойчивости (2) должно выполняться (3)

$$a_0^0 > \gamma\alpha_0,\ a_2^0 > \gamma\alpha_2 \cdot \qquad (3)$$

После построения годографа $z(j\omega)$ определяем радиус устойчивости семейства (2)

$$\gamma_{\max} = \min\{\gamma^*, \gamma_0, \gamma_2\}, \gamma_0 = a_0^0/\alpha_0,\ \gamma_2 = a_2^0/\alpha_2,$$

где $\gamma^*$ – наибольший размер квадрата $\{|x(\omega)| \leq \gamma^*, |y(\omega)| \leq \gamma^*\}$, который вписан в $z(j\omega)$.

Последние равенства вытекают из условия (3).

### Робастная устойчивость АСР температуры в нижней части СК

На основе экспериментальной переходной кривой для установки КР Л-35-11/1000 получим номинальный полином знаменателя передаточной функции АСР температуры в нижней части СК (4)

$$P_0(s) = 1 + 13{,}53s + 81{,}06s^2 \qquad (4)$$

с коэффициентами $a^0$=(1;13,53;81,06) и размахом коэффициентов $\alpha$=(0,1;1;10).

Необходимо определить, возможна ли робастная устойчивость семейства полиномов (2) с номинальным полиномом (4).

Сначала проверим, существует ли $\gamma>0$, обеспечивающее выполнение неравенства (3) – это нужно сделать в первую очередь, поскольку и коэффициенты номинального полинома и их размах заданы:

$$1 > \gamma \cdot 0{,}1,\ 81{,}06 > \gamma \cdot 10 \Rightarrow$$

$$\gamma < 10,\ \gamma < 8{,}106.$$

Таким образом существует $0<\gamma<8{,}106$.

Введем величины

$$U_0(\omega) = a_0^0 - a_2^0\omega^2 = 1 - 81{,}06\omega^2,$$

$$V_0(\omega) = a_1^0 = 13{,}53,$$

$$R(\omega) = \alpha_0 + \alpha_2\omega^2 = 0{,}1 + 10\omega^2,$$

$$T(\omega) = \alpha_1 = 1$$

и построим годограф номинального полинома

$$P_0(j\omega) = U_0(\omega) + j\omega V_0(\omega) =$$

$$= 1 - 81{,}06\omega^2 + j13{,}53\omega$$

и годограф Цыпкина–Поляка

$$z(j\omega) = x(\omega) + jy(\omega) = \frac{U_0(\omega)}{R(\omega)} +$$

$$+ j\frac{V_0(\omega)}{T(\omega)} = \frac{1 - 81{,}06\omega^2}{0{,}1 + 10\omega^2} + j13{,}53.$$

Найдем точки пересечения с осями:

$$\omega = 0:\ P_0(0) = 1,\ \ z(0) = 10 + j13{,}53,$$

$$\mathrm{Re}(P_0(j\omega)) = 0,\ \mathrm{Re}(z(j\omega)) = 0 \Rightarrow$$

$$\omega \approx 0{,}111:\ P_0(0{,}111) = j1{,}503, z(0{,}111) = j13{,}53,$$

$$\mathrm{Im}(P_0(j\omega)) = 0 \Rightarrow \omega = 0, \mathrm{Im}(z(j\omega)) = 0 \Rightarrow \omega = \varnothing,$$

$$\omega \to \infty: P_0(\infty) = -\infty + j\infty, z(\infty) = -8{,}106 + j13{,}53 \cdot$$

Результаты моделирования представлены на рис. 4, 5.

Из рис. 5 видно, что существует квадрат со сторонами, равными $\gamma \in (0;8{,}106)$, вписанный в годограф $z(j\omega)$, значит, семейство полиномов обладает робастной устойчивостью.

Определяем радиус устойчивости интервального семейства:

$$\gamma_{\min} = \min\{\gamma^*; \gamma_0; \gamma_2\} =$$

$$= \min\{13{,}53;\ 8{,}106;\ 10\} = 8{,}106,$$

где $\gamma^*$=13,53; $\gamma_0=a_0^0/\alpha_0$=8,106, $\gamma_2=a_2^0/\alpha_2$=10.

Отметим существенное отличие годографов Цыпкина–Поляка и Михайлова. Это объясняется наличием одинаковых степеней знаменателя и числителя дробно-рациональных функций $x(\omega)$, $y(\omega)$ [20].

### Заключение

Таким образом, на основе построения годографа Цыпкина–Поляка рассмотренное семейство полиномов знаменателя передаточной функции АСР температуры в нижней части СК обладает робастной устойчивостью с радиусом устойчивости, равным 8,106. Данный результат используется при разработке АСР температуры в нижней части СК и выборе настроек регуляторов.

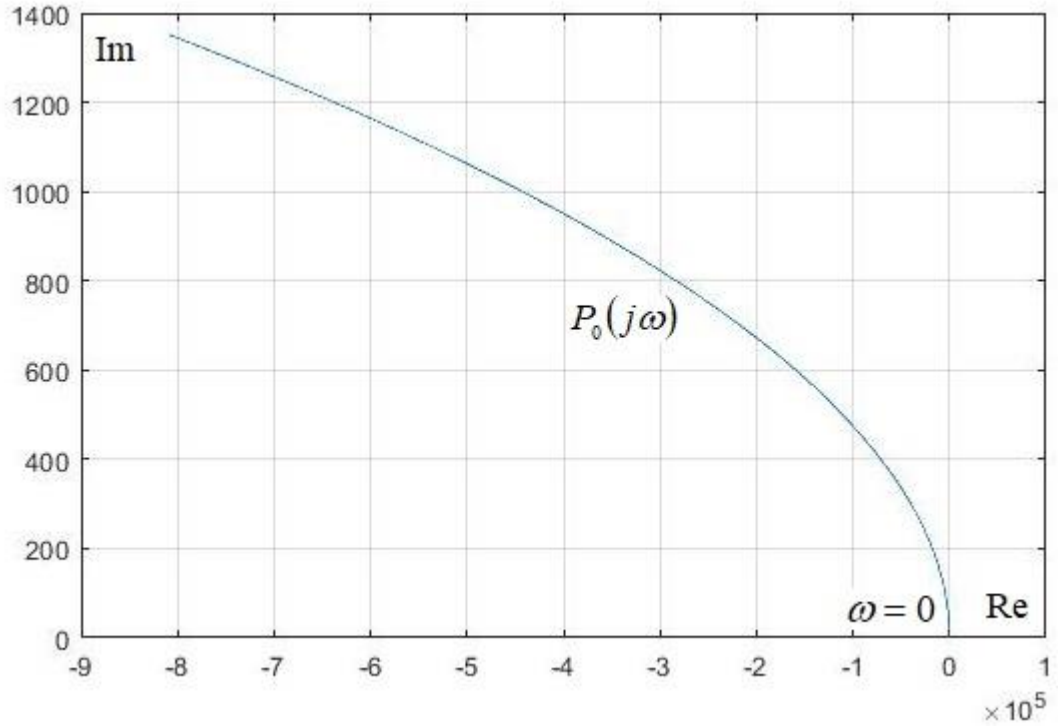



***Рис. 3.*** *Годограф номинального полинома*
***Fig. 3.*** *Nominal polynomial hodograph*

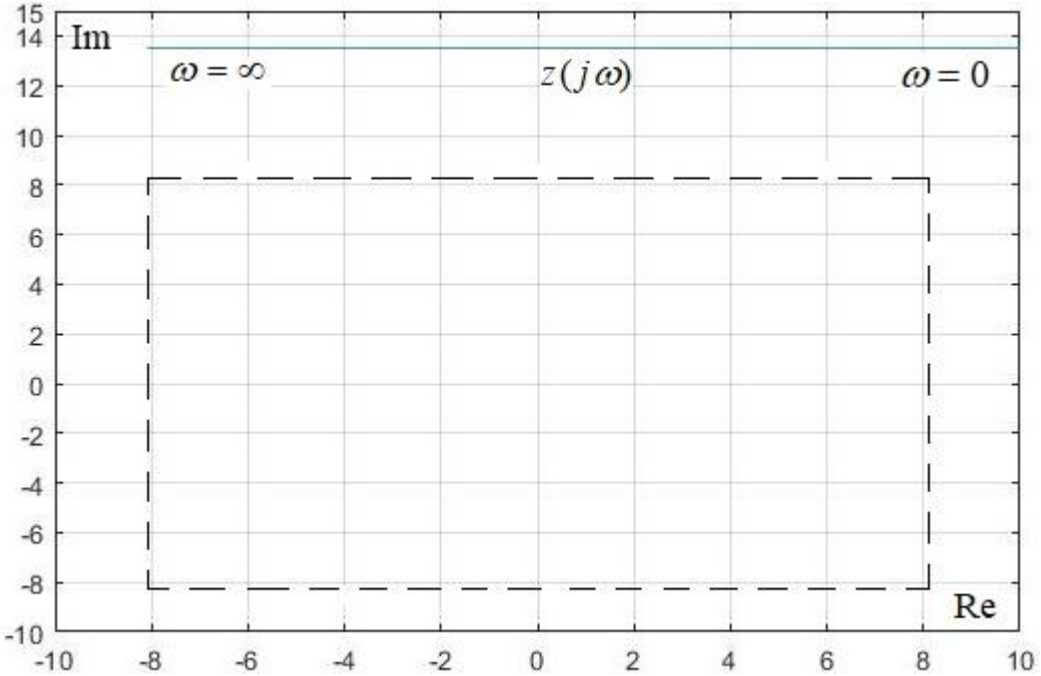



***Рис. 4.*** *Годограф Цыпкина–Поляка*
***Fig. 4.*** *Tsypkin–Polyak hodograph*

## СПИСОК ЛИТЕРАТУРЫ

1. Джамбеков А.М., Щербатов И.А. Локальный ПИД-регулятор стабилизации катализата // Современные технологии. Системный анализ. Моделирование. – 2016. – № 3 (51). – С. 98–104.
2. Исследование процесса каталитического риформинга бензиновых фракций казахстанских нефтей и газоконденсатов / Ж.А. Карабаев, М.М. Есиркепова, О.Н. Нургали, А.К. Булегенов, О.М. Калмырза // Современные научные исследования и инновации. – 2019. – № 1 (93). – С. 12.
3. Альмохсен М.А. Современные технологии каталитического риформинга // Аллея науки. – 2019. – Т. 3. – № 5 (32). – С. 130–132.
4. Pinheiro C.I.C., Fernandes J.L., Domingues L. Catalytic cracking (FCC) process modeling, simulation and control // Industrial I Engineering Chemistry Research. – 2012. – № 51 (1). – P. 1–29.
5. Gumen M.I. Increasing of the efficiency of the reforming LG-35-11/300 // Petroleum Processing and Petrochemistry. – 2001. – № 11. – P. 54–57.

6. Weekman V.A. Model of catalytic cracking conversion in fixed, moving and fluid-bed reactors // Industrial and Engineering Chemistry Process Design and Development. – 1968. – № 7 (1). – P. 90–95.
7. Ефремов В.В., Шелудько А.Г. Расчёт робастно-устойчивости автоматической системы регулирования температуры водообогреваемой спецодежды водолаза // Дизайн и технологии. – 2013. – № 34 (76). – С. 75–79.
8. Шариков Ю.В., Ткачев И.В., Снегирев Н.В. Моделирование оптимального управления нелинейным объектом // Теоретические основы химической технологии. – 2020. – Т. 54. – № 5. – С. 572–583.
9. Математическое моделирование каталитических процессов переработки углеводородного сырья / А.В. Кравцов, Э.Д. Иванчина, Е.Н. Ивашкина, А.В. Костенко, Е.М. Юрьев, В.С. Бесков // Катализ в промышленности. – 2008. – № 6. – С. 41–46.
10. Mircea C., Agachi S., Marimoiu V. Simulation and model predictive control of a UOP fluid catalytic cracking // Chemical Engineering and Processing. – 2003. – V. 42. – 67 p.
11. Ancheyta J. Modeling and simulation of catalytic reactors for petroleum refining. – Hoboken: Wiley, 2011. – 528 p.
12. Smith J.M. Chemical engineering kinetics. – St. Louis: McGraw-Hill, 1981. – 676 p.
13. Управление инновационным развитием наукоемкой производственной системы / В.Г. Матвейкин, Б.С. Дмитриевский, О.В. Дмитриева, В.Р. Разиева, М.В. Сивова // Вопросы современной науки и практики. – 2016. – № 3 (61). – С. 146–152.
14. Литовка Ю.В., Као В.З. Моделирование и оптимизация гальванической ванны с дополнительными катодами // Вестник Тамбовского государственного технического университета. – 2016. – Т. 22. – № 1. – С. 68–74.
15. Задача управления процессом каталитического риформинга и метод ее решения / В.Г. Матвейкин, Б.С. Дмитриевский, А.Г. Кокуев, А.М. Джамбеков // Известия Томского политехнического университета. Инжиниринг георесурсов. – 2019. – Т. 330. – № 6. – С. 59–67.
16. Антонов О.В., Проталинский О.М. Построение комбинированных математических моделей технологических процессов // Известия высших учебных заведений. Северо-Кавказский регион. Серия: Естественные науки. – 2003. – № 4. – С. 4–7.
17. Проталинский О.М. Применение методов искусственного интеллекта при автоматизации технологических процессов: монография. – Астрахань: Изд-во Астрах. гос. техн. ун-та, 2004. – 183 с.
18. Поляк Б.Т., Щербаков П.С. Робастная устойчивость и управление. – М.: Наука, 2002. – 303 с.
19. Nguang S.K. Robust stabilization of a class of time-delay nonlinear systems // IEEE Transactions on Automatic Control. – 2000. – V. 45. – № 4. – P. 756–762.
20. Wu L., Zhou W. Delay-dependent robust stabilization for uncertain singular systems with discrete and distributed delays // Journal of Control Theory and Applications. – 2008. – № 6. – P. 171–176.

*Поступила 03.05.2021 г.*

**Информация об авторах**

***Джамбеков А.М.***, кандидат технических наук, преподаватель отделения связи и телекоммуникаций Факультета среднего профессионального образования Астраханского государственного технического университета.

***Дмитриевский Б.С.***, доктор технических наук, профессор, профессор кафедры информационных процессов и управления Института автоматики и информационных технологий Тамбовского государственного технического университета.

UDC 681.5.037

# SIMULATION OF AN AUTOMATIC TEMPERATURE CONTROL SYSTEM FOR THE STABILIZATION CATALYSATE PROCESS IN CONDITIONS OF UNCERTAINTY

**Azamat M. Dzhambekov**[1],
dzhambekovam@yandex.ru

**Boris S. Dmitrievsky**[2],
dmiboris@yandex.ru

[1] Astrakhan State Technical University,
16, Tatishchev street, Astrakhan, 414056, Russia.

[2] Tambov State Technical University,
106, Sovetskaya street, Tambov, 392000, Russia.

***The relevance*** *of the work is caused by the necessity to take into account the influence of disturbances (changes in the quality of the unstable catalysate, the quality of the fuel gas) on temperature control in the lower part of the stabilization column of the catalysate stabilization unit of the catalytic reforming unit. The temperature of the bottom of the stabilization column is an important characteristic of the catalysate stabilization unit, which indicators characterize the quality of functioning of the entire reforming complex. The peculiarity of the control object under consideration consists in the qualitative information contained in the input values and disturbing influences, which include the state of the tubular furnace, the content of benzene-forming substances in the unstable catalysate, the quality of the unstable catalysate, and the quality of the fuel gas. This information is evaluated by operators based on the experience of technologists, taken into account in the form of linguistic parameters based on the results of a survey of experts and represented by membership functions. The influence of perturbations is proposed to be considered in terms of the parameters of the transfer function of the control system based on robust stability methods. It is assumed that these coefficients change over time under the influence of perturbations. At the same time, the task of studying the robust stability under temperature control is important.*
***Objective:*** *to provide a stable temperature control regime for stabilization column under conditions of uncertainty.*
***Object:*** *unit for catalysate stabilization of a catalytic reforming unit with continuous catalyst regeneration.*
***Methods:*** *theory of catalytic reforming, modeling, automatic control theory, systems analysis, computational mathematics.*
***Results.*** *The paper posed and solved the problem of studying the stability of the temperature control of the stabilization column under conditions of uncertainty. The characteristic of the scheme of catalysate stabilization is given. The control object is analyzed, the variables are distributed into groups as vectors, and the features of the control object are marked. The robust stability is investigated, the simulation results are presented, and the stability radius is determined, which makes it possible to ensure a stable operation of the automatic temperature control system of the lower part of the column under uncertainty.*

***Key words:***
*Catalytic reforming, column bottom temperature, regulation, transfer function, robust stability, nominal polynomial, family of polynomials.*

## REFERENCES

1. Dzhambekov A.M., Shcherbatov I.A. Local PID regulator for stabilization of catalysis. *Modern Technologies. System Analysis. Modeling*, 2016, no. 3 (51), pp. 98–104. In Rus.
2. Karabaev Zh.A., Esirkepova M.M., Nurgali O.N., Bulegenov A.K., Kalmyrza O.M. Issledovanie protsessa kataliticheskogo riforminga benzinovykh fraktsy kazakhstanskikh neftey i gazokondensatov [Investigation of catalytic reforming of gasoline fractions of Kazakhstani oils and gas condensates]. *Sovremennye nauchnye issledovaniya i innovatsii*, 2019, no. 1 (93), p. 12.
3. Almokhsen M.A. Modern technologies of catalytic reforming. *Science Alley*, 2019, vol. 3, no. 5 (32), pp. 130–132. In Rus.
4. Pinheiro C.I.C., Fernandes J.L., Domingues L. Catalytic cracking (FCC) process modeling, simulation and control. *Industrial I Engineering Chemistry Research*, 2012, no. 51 (1), pp. 1–29.
5. Gumen M.I. Increasing of the efficiency of the reforming LG-35-11/300. *Petroleum Processing and Petrochemistry*, 2001, no. 11, pp. 54–57.
6. Weekman V.A. Model of catalytic cracking conversion in fixed, moving and fluid-bed reactors. *Industrial and Engineering Chemistry Process Design and Development*, 1968, no. 7 (1), pp. 90–95.
7. Efremov V.V., Sheludko A.G. Raschet robastno-ustoychivosti avtomaticheskoy sistemy regulirovaniya temperatury vodoobogrevayemoy spetsodezhdy vodolaza [Calculation of the robustness of an automatic system for regulating the temperature of a water-heated overalls for a diver]. *Dizayn i tekhnologii*, 2013, no. 34 (76), pp. 75–79.
8. Sharikov Yu.V., Tkachev I.V., Snegirev N.V. Modelirovanie optimalnogo upravleniya nelineynym obyektom [Modeling optimal control of a nonlinear object]. *Teoreticheskie osnovy khimicheskoy tekhnologii*, 2020, vol. 54, no. 5, pp. 572–583.
9. Kravtsov A.V., Ivanchina E.D., Ivashkina E.N., Kostenko A.V., Yuriev E.M., Beskov V.S. Matematicheskoe modelirovanie kataliticheskikh protsessov pererabotki uglevodorodnogo syrya [Mathematical modeling of catalytic processes for processing hydrocarbon raw materials]. *Kataliz v promyshlennosti*, 2008, no. 6, pp. 41–46.
10. Mircea C., Agachi S., Marimoiu V. Simulation and model predictive control of a UOP fluid catalytic cracking. *Chemical Engineering and Processing*, 2003, vol. 42, 67 p.
11. Ancheyta J. *Modeling and simulation of catalytic reactors for petroleum refining*. Hoboken, Wiley, 2011. 528 p.
12. Smith J.M. *Chemical engineering kinetics*. St. Louis, McGraw-Hill, 1981. 676 p.
13. Matveykin V.G., Dmitrievsky B.S., Dmitrieva O.V., Razieva V.R., Sivova M.V. Upravlenie innovatsionnym razvitiem naukoemkoy proizvodstvennoy sistemy [Management of innovative development of a science-intensive production system]. *Voprosy sovremennoy nauki i praktiki*, 2016, no. 3 (61), pp. 146–152.
14. Litovka Yu.V., Kao V.Z. Modeling and optimization of a galvanic bath with additional cathodes. *Bulletin of the Tambov State Technical University*, 2016, vol. 22, no. 1, pp. 68–74. In Rus.
15. Matveykin V.G., Dmitrievsky B.S., Kokuev A.G., Dzhambekov A.M. The task of managing the process of catalytic reforming and the method for its solution. *Bulletin of the Tomsk Polytechnic University. Geo Assets Engineering*, 2019, vol. 330, no. 6, pp. 59–67. In Rus.

16. Antonov O.V., Protalinsky O.M. Construction of combined mathematical models of technological processes. *News of Higher Educational Institutions. North Caucasian Region. Series: Natural Sciences*, 2003, no. 4, p. 4–7. In Rus.
17. Protalinsky O.M. *Primenenie metodov iskusstvennogo intellekta pri avtomatizatsii tekhnologicheskikh protsessov: monografiya* [The use of artificial intelligence methods in the automation of technological processes: monograph]. Astrakhan, Astrakhan State Technical University Publ. house, 2004. 183 p.
18. Polyak B.T., Shcherbakov P.S. *Robastnaya ustoychivost i upravlenie* [Robust stability and control]. Moscow, Nauka Publ., 2002. 303 p.
19. Nguang S.K. Robust stabilization of a class of time-delay nonlinear systems. *IEEE Transactions on Automatic Control*, 2000, vol. 45, no. 4, pp. 756–762.
20. Wu L., Zhou W. Delay-dependent robust stabilization for uncertain singular systems with discrete and distributed delays. *Journal of Control Theory and Applications*, 2008, no. 6, pp. 171–176.

*Received: 3 May 2021.*

**Information about the authors**

***Azamat M. Dzhambekov***, Cand. Sc., teacher, Astrakhan State Technical University.

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

УДК 552.086

# ВОЗМОЖНОСТИ ОПРЕДЕЛЕНИЯ ТИПА СМАЧИВАЕМОСТИ КОЛЛЕКТОРОВ ПО ДАННЫМ КАРОТАЖА ПРИ ОПТИМИЗАЦИИ СИСТЕМЫ ЗАВОДНЕНИЯ НЕФТЯНЫХ ПЛАСТОВ

**Галкин Сергей Владиславович**[1],
doc_galkin@mail.ru

**Колычев Игорь Юрьевич**[1],
igorek999@yandex.ru

**Ракинцев Владимир Андреевич**[2],
rakintsevv.a@mail.ru

[1] Пермский национальный исследовательский политехнический университет,
Россия, 614990, г. Пермь, Комсомольский пр., 29.

[2] Филиал ООО «ЛУКОЙЛ-Инжиниринг» «ПермНИПИнефть» в г. Перми,
Россия, 614015, г. Пермь, ул. Пермская, 3а.

***Актуальность.*** *Смачиваемость нефтенасыщенных коллекторов в значительной степени влияет на технологические особенности разработки эксплуатационных объектов, прежде всего, на эффективность заводнения нефтяных пластов. Возможности определения смачиваемости по данным геофизических исследований скважин позволяют учитывать данный показатель при геолого-технологическом моделировании разработки эксплуатационных объектов, в том числе при оптимизации заводнения нефтяных пластов. Данная задача решена для условий залежей терригенных нефтенасыщенных коллекторов на основе комплексирования методов определения пористости, бокового электрического каротажа и микробокового каротажа. В публикации представлены результаты и анализ динамики приемистости нагнетательных скважин для битуминозных, гидрофобизированных и гидрофильных коллекторов. Для участков с низкой приемистостью скважин предложены геолого-технические мероприятия по оптимизации системы заводнения нефтяных пластов.*

***Цель:*** *оценить возможность достоверного определения смачиваемости нефтенасыщенных терригенных коллекторов, провести сравнительный анализ влияния показателя смачиваемости коллекторов на эффективность заводнения нефтяных пластов, для различных геологических условий предложить эффективные технологические условия разработки эксплуатационных объектов.*

***Объект:*** *нефтенасыщенные коллекторы визейских нефтяных залежей Соликамской депрессии (Пермский край).*

***Методика:*** *разработка методологии и определение типа смачиваемости и степени битумизации интервалов терригенных коллекторов по данным комплексирования гамма каротажа, бокового электрического каротажа и микробокового каротажа; анализ динамики приемистости нагнетательных скважин для различных выделенных типов смачиваемости.*

***Результаты.*** *Авторами на основе разработанной методики получены схемы зональности развития гидрофобизации и битумизации нефтенасыщенных коллекторов для объекта Тл-Бб Уньвинского месторождения. Проведен анализ динамики работы нагнетательных скважин для условий битуминозного, гидрофобизированного и гидрофильного геологического разреза. Построены схемы зональности развития процессов гидрофобизации и битумизации коллекторов, с которыми связаны участки снижения приемистости нагнетательных скважин. Предложены геолого-технические мероприятия по оптимизации системы заводнения нефтяных пластов в коллекторах гидрофобно-битуминозного типа.*

***Ключевые слова:***
*Смачиваемость, гидрофобный коллектор, битумизация, геофизические исследования скважин, удельное электрическое сопротивление, боковой электрический каротаж, заводнение нефтяных пластов.*

## Введение

При эксплуатации нефтяных месторождений влияние смачиваемости поверхности горных пород на условия разработки является достаточно очевидным. Как правило, при разработке проектно-технологической документации смачиваемость оценивается исключительно на керновом материале, где апробировано множество методов (адсорбционные, Амотта и др.) [1–3]. При анализе на кернах структурного пространства гидрофобизированных коллекторов в последние годы активно используется метод рентгеновской томографии [4–6]. В работе [7] с помощью комплексирования методов электронной микроскопии и рентгеновской томографии рассмотрены возможности изучения смачиваемости в различных масштабах от нанометров до сантиметров. Вместе с тем керном всегда охарактеризована лишь незначительная доля интервалов геологического разреза, в результате чего показатели смачиваемости пород фактически не используются при геолого-технологическом моделировании нефтяных месторождений, в том числе и для Пермского региона [8–10].

Определение смачиваемости по данным геофизических исследований скважин (ГИС) позволит во всем объеме залежи охарактеризовать данный показатель и значительно повысить качество технологических решений при разработке нефтяных эксплуатационных объектов. Данная проблема рассмотрена на примере месторождений Пермского региона, для которого крупные открытия нефтяных запасов последних лет приурочены к визейским коллекторам (пласты Тл, Бб, Мл) территории Соликамской депрессии. На этих новых месторождениях (Ростовицкое, им. Сухарева и ряд других более мелких) в настоящее


DOI 10.18799/24131830/2022/1/3225

время формируется система заводнения пластов, которая может быть оптимизирована с учетом информации по смачиваемости коллекторов.

Анализ истории разработки месторождений Соликамской депрессии показывает, что на визейских объектах реализуется преимущественно внутриконтурное заводнение, причем в ряде случаев наблюдается низкая приемистость нагнетательных скважин и как следствие неудовлетворительная компенсация отобранных объемов нефти закачкой. Для ряда сопредельных территорий (Татарстан, Башкортостан) снижение продуктивности скважин связывается с битумизацией коллекторов. Битуминозные интервалы представлены песчаниками темного, часто до черного, окраса с низкой открытой пористостью ($К_п$).

Наиболее полно данные вопросы рассмотрены в работе [11], где процессы развития гидрофобизации коллекторов считаются вторичными во взаимосвязи с окислением нефтей на участках формирования древних водонефтяных контактов (ВНК) [11, 12]. Анализ показывает, что эти процессы, как правило, приурочены к крупным структурным поднятиям, для которых в историческом времени наиболее вероятны процессы переформирования ВНК.

Степень битумизации коллекторов зависит от их фильтрационно-емкостных свойств (ФЕС). Малопроницаемые коллекторы в геологическом разрезе выделяются в виде темных битуминозных пластов. В интервалах с лучшими ФЕС за длительное геологическое время битумы вымываются из порового пространства, что приводит к осветлению пород, но не к восстановлению их начальной гидрофильности.

### Обоснование критериев выделения гидрофобизированных и битуминозных коллекторов по данным геофизических исследований скважин

Электрический ток в нефтенасыщенных коллекторах движется по пустотам, занятым остаточной водой, поэтому для них условием низких удельных электрических сопротивлений (УЭС) является непрерывность распределения в пустотном пространстве водной фазы. Гидрофобизация пород ведет к нарушению непрерывности водной фазы, в результате чего УЭС резко возрастает. В работе [13] проведены эксперименты изменения смачиваемости образцов керна из одного и того же типа породы, в результате которых построена модель влияния смачиваемости на измерения УЭС. В целом, согласно известным расчетным формулам оценки УЭС [14, 15], показатель смачиваемости находится в их степенной части, что делает его влияние на показания УЭС определяющим. Аномально высокие показания УЭС в гидрофобных нефтенасыщенных коллекторах подтверждаются промысловыми данными для месторождений Татарстана [16], Пермского края [17], республики Коми [18] и других территорий.

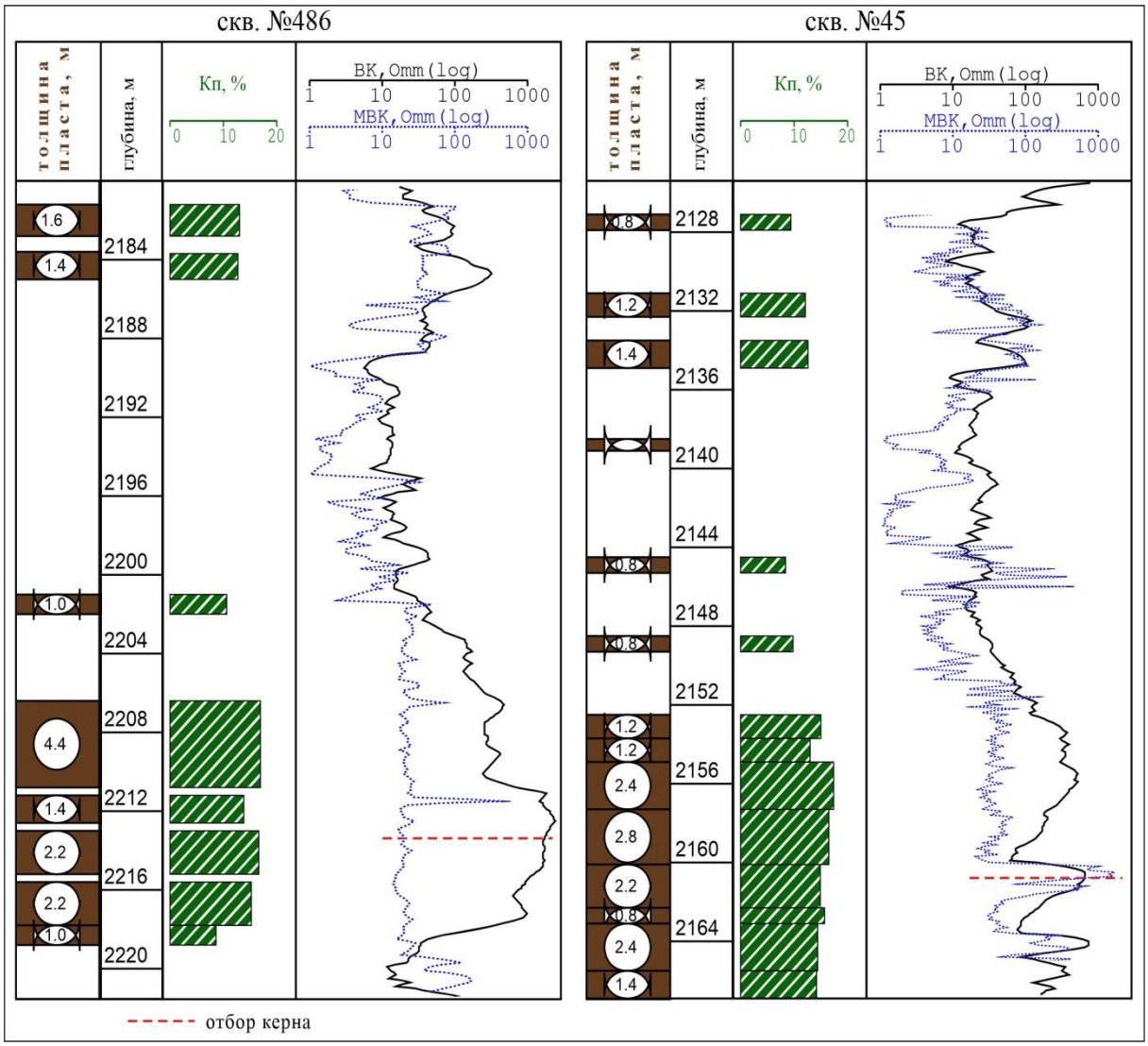
Для Пермского края высокие УЭС встречены повсеместно. Однако юг территории активно разбуривался более 40 лет назад с применением стандартного электрического каротажа, для которого достоверное определение УЭС возможно для пропластков более 2 м. Район Соликамской депрессии начал разбуриваться позднее (с конца 80-ых гг. XX в.) с применением бокового электрического каротажа (БК), который позволяет более надежно определять УЭС пород, в том числе для маломощных пропластков (h>0,8 м) [19–21].

Таким образом, для визейских терригенных коллекторов нефтяных месторождений Соликамской депрессии можно по данным БК провести районирование территории по типу их смачиваемости. В работах [17, 22] на основе сопоставления данных керна и БК для визейских коллекторов установлены закономерности влияния смачиваемости на УЭС пород. При анализе для изучения структурного пространства керна из различных интервалов разреза по УЭС дополнительно выполнялись анализ шлифов и исследования методом рентгеновской томографии. В результате сделаны выводы, что интервалы нефтенасыщенного разреза с УЭС<120 Ом·м гидрофильны, с УЭС>200 Ом·м начинают проявляться явные признаки гидрофобности, а при УЭС>600 Ом·м коллекторы гидрофобны [22].

Для анализа в данной работе дополнительно привлечены результаты микробокового каротажа (МБК). Низкие показания МБК характеризуют проникновение фильтрата бурового раствора в пласт, повышенные УЭС – отсутствие проникновения, что интерпретируется как следствие битумизации коллекторов.

На рис. 1 представлены примеры диаграмм БК и МБК для скважин Уньвинского месторождения нефти. Для скважины 486 интервал с отбором керна (глубина 2214 м) представлен высокопористым ($К_п$=21,4 %) светлым песчаником без следов битумизации. Данный интервал характеризуется низкими значениями по МБК – 18 Ом·м, и очень высокими по БК – 1000 Ом·м (рис. 1, *а*). Для скважины 45 интервал с отбором керна (глубина 2160 м) представлен мелкозернистым черным битуминозным песчаником с $К_п$=13,5 %. Данный интервал характеризуется аномально высоким УЭС по МБК (600 Ом·м), по БК он также уверенно относится к высокоомному разрезу (рис. 1, *б*).

В целом для Пермского региона присутствие в геологическом разрезе визейских отложений битуминозных интервалов установлено менее чем для 20 % скважин. Для нефтяных визейских залежей Соликамской депрессии на выборке 66 образцов керна (14 с битумом и 52 без битума) развитие битумизации сопоставлено с петрофизическими исследованиями. В результате сделан вывод, что битумизация коллекторов не характерна для гидрофильных коллекторов с УЭС менее 60 Ом·м (13 из 14). При УЭС по МБК менее 10 Ом·м все образцы керна (18 из 18) оказались без битумов. По мере роста показаний МБК вероятность битумизации последовательно возрастает, и при МБК>200 Ом·м все образцы (3 из 3) битуминозны. При этом битумизация коллекторов практически исключается при $К_п$>16 % (30 из 31), наиболее вероятна при $К_п$<12 % (3 из 4). При отсутствии исследований методами БК и МБК с определенной долей погрешности граничным значением, разделяющим интервалы на битуминозные и нет, может рассматриваться $К_п$=14 %.




*а/a* *б/b*

***Рис. 1.*** *Диаграммы методов электрического бокового и микробокового каротажа для продуктивных пластов в скважинах 486 (а) и 45 (б) Уньвинского месторождения нефти*

***Fig. 1.*** *Diagrams of electrical lateral and micro-lateral logging methods for productive formations in wells 486 (a) and 45 (b) of the Unvinskoe oil field*

При классификации по выработанным критериям 51 интервала обучающей выборки с полным комплексом методов ($К_п$, БК, МБК) верно распознаются 48 интервалов; с неопределенной оценкой – 1; неверно оценены 2 битумизированных интервала. Ошибка прогноза типа смачиваемости при этом составляет 4 %.

При классификации 66 интервалов с комплексом методов $К_п$ и БК (отсутствии данных по МБК) верно классифицируются 58 интервалов; с неопределенной оценкой – 1; неверно оценены 7 интервалов. Ошибка прогноза в данном случае увеличивается до 11 %.

### Построение схемы распространения коллекторов с различным типом смачиваемости и битумизации для коллекторов Уньвинского месторождения

Приведенные выше принципы оценки гидрофобизации и битуминозности применены для визейских коллекторов Уньвинского месторождения, для которого самостоятельными объектами разработки являются Уньвинское (на юго-западе), Юго-Восточное и Палашерское (на севере) поднятия. На месторождении с применением системы поддержания пластового давления (ППД) ведется совместная эксплуатация тульских и бобриковских терригенных коллекторов (объект Тл-Бб). По данным керна и ГИС более половины значений $К_п$ распределяются в диапазоне от 13 до 18 %, причем в интервалы менее 8 % и более 25 % попадает малая доля интервалов [23], что, по классификации А.А. Ханина, соответствует средним значениям ФЕС.

Для скважин Уньвинского месторождения рассчитана доля гидрофобизации коллекторов ($Д_{фоб}$) как отношение суммарных толщин с гидрофобизацией коллекторов к общей нефтенасыщенной толщине (от 0 до 1 д.е.). На рис. 2 приведена полученная в результате схема распространения степени гидрофобизации коллекторов. Светлый цвет на схеме соответствует участкам отсутствия гидрофобизации ($Д_{фоб}$ от 0 до

0,2 д.е.), наиболее темный – максимальной гидрофобизации коллекторов ($Д_{фоб}$ от 0,8 до 1 д.е.).

Из рис. 2 видно, что на площади Уньвинского месторождения выделяются крупные зоны развития как гидрофильных, так и гидрофобных коллекторов, что подтверждает связь данного процесса, прежде всего, с геолого-тектоническими факторами. Коллекторы на Уньвинском поднятии в нефтеносной части преимущественно характеризуются высокоомным разрезом, ввиду чего практически вся площадь отнесена при прогнозе к гидрофобизированным участкам. В наименьшей степени процессы гидрофобизации проявляются для восточной части Палашерского и для Юго-Восточного поднятий.

Результаты анализа кернов Уньвинского месторождения показывают, что битумы встречены в половине исследованных интервалов (9 из 18). В результате расчета доли битумизированных коллекторов в общей нефтенасыщенной толщине ($Д_{бит}$) построена схема битумизации коллекторов (рис. 3).

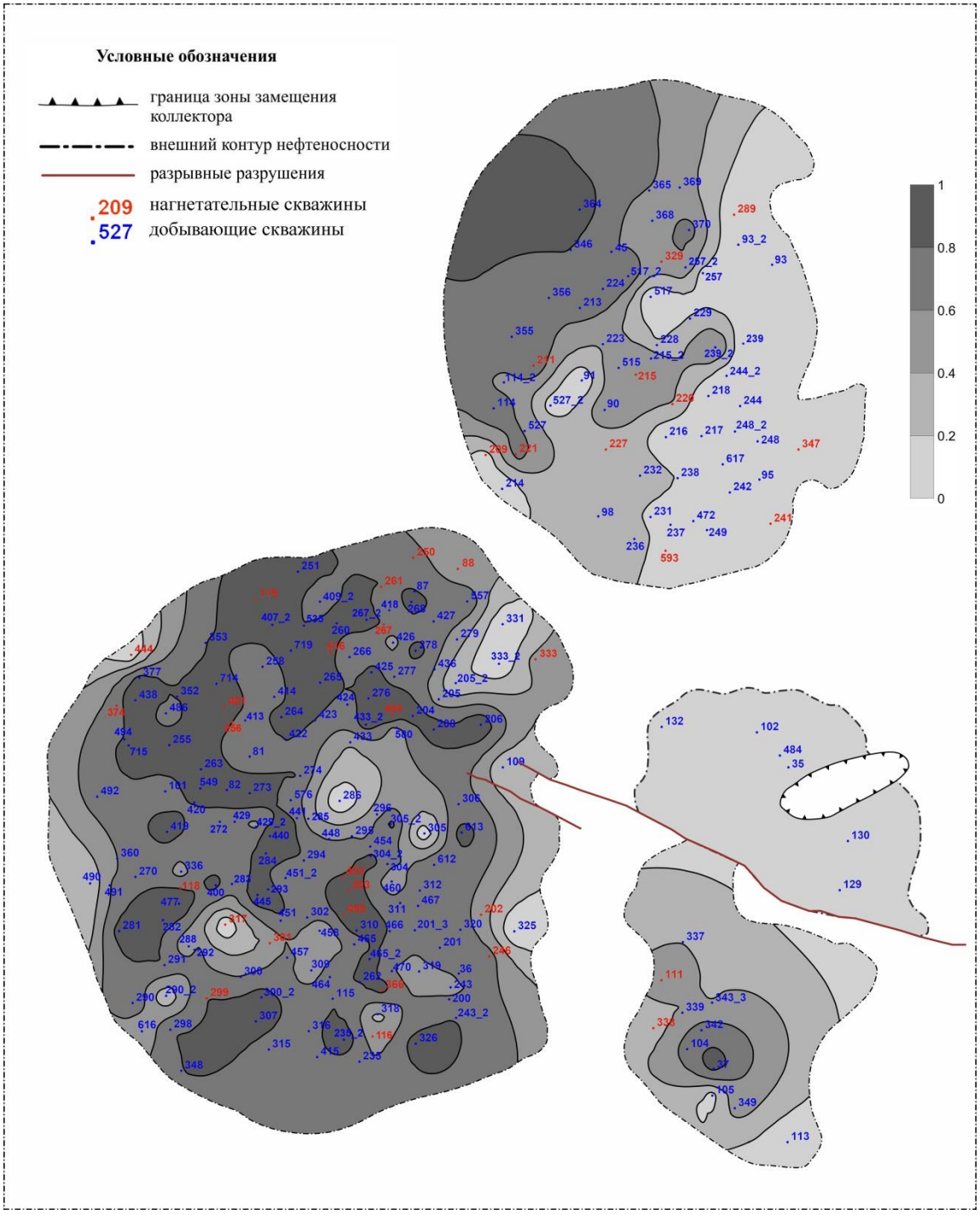



***Рис. 2.*** *Схема распространения доли гидрофобизированных коллекторов для эксплуатационного объекта Тл-Бб Уньвинского месторождения*

***Fig. 2.*** *Scheme of distribution of the share of hydrophobized reservoirs for the Tl-Bb production facility of the Unvinskoe field*

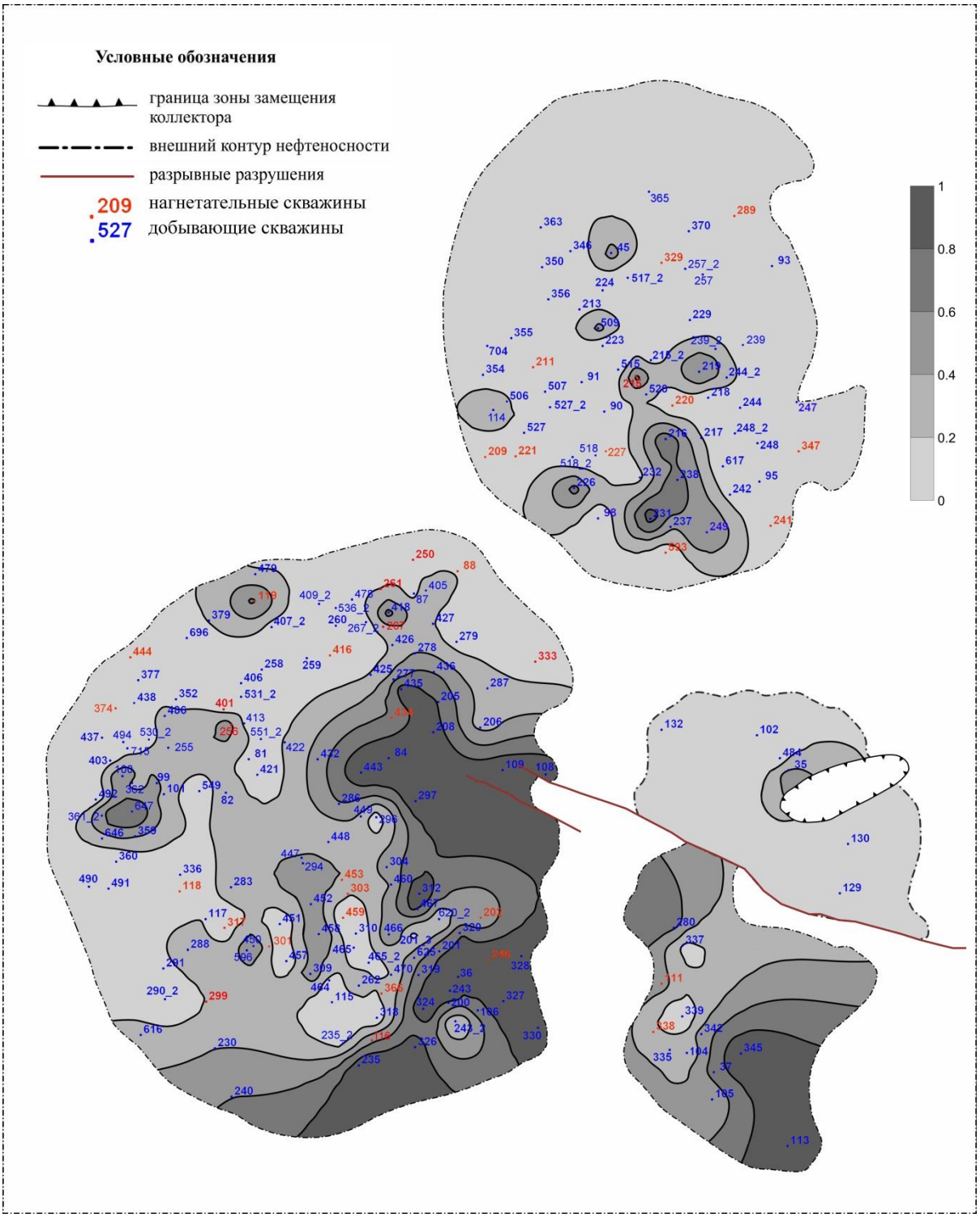



***Рис. 3.*** *Схема распространения доли битумизированных коллекторов для эксплуатационного объекта Тл-Бб Уньвинского месторождения*

***Fig. 3.*** *Scheme of distribution of the share of bituminized reservoirs for the production facility Tl-Bb of the Unvinskoe field*

Для Уньвинского поднятия битумизация проявляется наиболее интенсивно в восточной части, где локализуются коллекторы преимущественно с низкой пористостью. Западная и северная часть залежи, напротив, представлены в основном высокопорситыми коллекторами, ввиду чего битумизация там встречена лишь на небольших локальных участках. На Юго-Восточном понятии битумизация установлена в южной и практически отсутствует в северной части. Для Палашерского поднятия в целом битумизация коллекторов не характерна, исключением является локальный участок на юге.

Для однородных по типу смачиваемости участков можно выделить следующие типы геологического разреза по характеру смачиваемости: битуминозный ($Д_{фоб}$>0,8 и $Д_{бит}$>0,8), гидрофобный ($Д_{фоб}$>0,8 и

$Д_{бит}$<0,8), гидрофильный ($Д_{фоб}$<0,8 и $Д_{бит}$<0,8). Битуминозный тип коллектора для объекта Тл-Бб в целом прослеживается на востоке Уньвинского поднятия, гидрофобный – на большей части Уньвинского и на северо-западе Палашерского поднятий, гидрофильный – на востоке Палашерского и юге Уго-Восточного поднятий.

В целом по площади Уньвинского месторождения установлена высокая степень вертикальной неоднородности коллекторов по типу смачиваемости. Для значительного количества скважин часть коллекторов вскрытого продуктивного разреза может относиться к одному типу, часть – к другому. Поэтому, помимо перечисленных ранее, выделены промежуточные типы: гидрофобно-битуминозный ($Д_{фоб}$>0,8 и 0,2<$Д_{бит}$<0,8) и гидрофобно-гидрофильный (0,2<$Д_{фоб}$<0,8 и $Д_{бит}$<0,8). Гидрофобно-битуминозный тип коллектора согласно прогнозной оценке приурочен к участкам, на которых переслаиваются низкопористые битуминозные и высокопористые гидрофобизированные коллекторы. Гидрофобно-гидрофильный тип характерен для коллекторов с высокими ФЕС с чередованием высоко- и низкоомных нефтенасыщенных интервалов. В наименьшей степени на Уньвинском месторождении прогнозируется битуминозно-гидрофильный разрез ввиду того, что в условиях развития преимущественно гидрофильных коллекторов их битумизация маловероятна.

Необходимо заметить, что установленные выше закономерности отражают гидрофобность и битуминозность интервалов коллекторов на макроуровне. Так, согласно общим теоретическим представлениям гидрофобизацию коллекторов принято в большей степени связывать с крупными порами. Вместе с тем в условиях нефтяного пласта для отдельных капилляров смачиваемость может иметь различный характер, что может проявляться даже в единичных образцах керна.

Как видно из диаграмм каротажа на рис. 1, для разрезов скважин характерно переслаивание коллекторов с различными УЭС по БК, что определяет их различную смачиваемость. При этом для гидрофобизированных коллекторов неоднородность геологического разреза будет усилена различной степенью битумизации в зависимости от ФЕС коллекторов. На рис. 2, 3 участки с неоднородностью геологического разреза по степени гидрофобизации $Д_{фоб}$ и битумизации $Д_{бит}$ характеризуются значениями от 0,2 до 0,8 д.е. При этом для некоторых районов возможно равномерное проявление по толщинам битуминозных, гидрофобных и гидрофильных коллекторов, что характеризует еще более сложную для анализа геологическую ситуацию.

#### Влияние типа смачиваемости и битумизации коллекторов на динамику приемистости нагнетательных скважин

Смачиваемость коллекторов влияет на динамику работы как добывающих, так и нагнетательных скважин. Для добывающих скважин до начала их обводнения процесс вытеснения нефти из гидрофильных коллекторов происходит в целом более эффективно. Однако в итоге для гидрофильных коллекторов могут формироваться объемы невытесненной нефти в крупных порах, для гидрофобного пласта конечная выработка нефти из крупных пор выше. Как было указано выше, разработка визейских залежей в Соликамской депрессии идет с заводнением пластов, в результате чего равновесное состояние пластовой системы может быть нарушено с изменением исходного характера смачиваемости. Это делает задачу достоверной оценки смачиваемости для нефтяных залежей, разрабатываемых с ППД, особенно актуальной. В целом определение характера влияния смачиваемости коллекторов на продуктивность добывающих скважин является сложной задачей, особенно в условиях высокой неоднородности коллекторов по смачиваемости.

Более определенно негативное влияние гидрофобизации и битумизации коллекторов должно проявляется при анализе эффективности закачки. Опыт разработки визейских объектов показывает, что применение методов интенсификации отборов в ряде случаев не полностью компенсируется закачкой жидкости в пласт. В данной работе выполнен анализ влияния типа смачиваемости коллекторов на динамику коэффициента приемистости ($К_{прием}$) нагнетательных скважин Уньвинского месторождения. Из рис. 2, 3 видно, что нагнетательные скважины располагаются равномерно на площади всех поднятий и приурочены к различным типам по смачиваемости. В результате учтена информация по работе 36 нагнетательных скважин, для которых были известны $К_{прием}$ с начала ввода их в эксплуатацию и в течение последующих 2 лет. Двухлетний период работы скважин задает в целом последующую динамику эксплуатации. На всех скважинах за этот временной период не проводились геолого-технические мероприятия (ГТМ), что позволяет для коллекторов различных типов сопоставить исходные условия эффективности закачки.

На рис. 4 приведены примеры динамики изменения $К_{прием}$ для выделенных типов геологического разреза. Из представленных примеров видно, что для некоторых скважин приемистость на двухлетнем интервале не достигает эффективных значений ($К_{прием}$<50 м$^3$/сут) (рис. 4, *а*, *б*). В ряде случаев динамика $К_{прием}$ может во времени иметь разнонаправленный характер. Так, для скважины 119 (рис. 4, *в*) при начальном значении $К_{прием}$ более 200 м$^3$/сут в дальнейшем наступил резкий спад до $К_{прием}$ менее 20 м$^3$/сут, после чего ко второму году $К_{прием}$ снова превысил 150 м$^3$/сут. В ряде случаев $К_{прием}$ на всем временном интервале имеет стабильно высокие значения ($К_{прием}$>200 м$^3$/сут), что свидетельствует об эффективности закачки без необходимости проведения дополнительных ГТМ (рис. 4, *г*).

Изменения в динамике приемистости нагнетательных скважин в зависимости от типа коллектора по смачиваемости систематизированы и сведены в таблицу. Для скважины № 246 (восточное крыло Уньвинского поднятия), продуктивная часть которой отнесена исключительно к битуминозному разрезу, значения $К_{прием}$ не превышают 50 м$^3$/сут (рис. 4, *а*). К гидрофобно-битуминозному типу отнесены шесть скважин, четыре из которых характеризуются $К_{прием}$

менее 100 м$^3$/сут. Также невысокая приемистость характерна преимущественно для гидрофобного разреза, для которого $К_{прием}$ менее 50 м$^3$/сут наблюдается для шести скважин. Для гидрофильного типа коллектора, напротив, не установлено примеров работы скважин со стабильно низкой приемистостью ($К_{прием}$<50 м$^3$/сут). В целом анализ результатов показывает, что для гидрофобизированного геологического разреза $К_{прием}$ ниже, чем в гидрофильных коллекторах, при этом низкая приемистость скважин может являться следствием битумизации или гидрофобизации коллекторов.

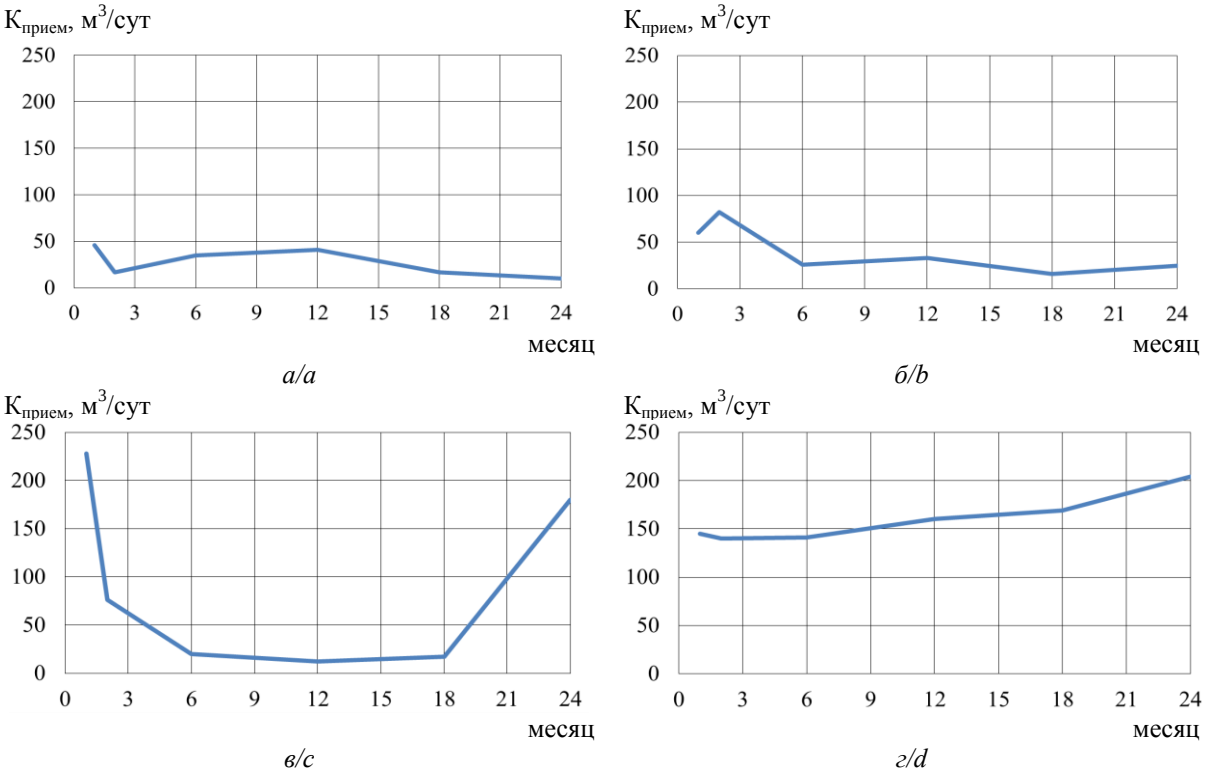



***Рис. 4.*** *Динамика изменения коэффициента приемистости для скважин с различным типом коллектора: а) битуминозный (скважина № 246); б) гидрофобно-битуминозный (скважина № 119); в) гидрофобно-гидрофильный (скважина № 301); г) гидрофильный (скважина № 241)*

***Fig. 4.*** *Dynamics of changes in well injectivity for wells with different types of reservoir: a) bituminous (well № 246); b) bituminous-hydrophobic (well № 119); c) hydrophilic-hydrophobic (well № 301); d) hydrophilic (well № 241)*

***Таблица.*** *Значения приемистости скважин в зависимости от типа коллектора*

***Table.*** *Values of well injectivity depending on the type of reservoir*

| тип коллектор<br>reservoir type | диапазон изменения $К_{прием}$, м$^3$/сут/variation range $K_{injectivity}$, m$^3$/day | | | | | |
|---|---|---|---|---|---|---|
| | <50 | 50–100 | 100–200 | >200 | без стабилизации<br>without stabilization | всего<br>total |
| битуминозный<br>bituminiferous | 1 | 0 | 0 | 0 | 0 | 1 |
| гидрофобно-битуминозный<br>hydrophobic-bituminiferous | 2 | 2 | 2 | 0 | 0 | 6 |
| гидрофобный<br>hydrophobic | 6 | 0 | 2 | 2 | 4 | 14 |
| гидрофобно-гидрофильный<br>hydrophobic-hydrophilic | 1 | 1 | 2 | 2 | 2 | 8 |
| гидрофильный<br>hydrophilic | 0 | 1 | 2 | 1 | 3 | 7 |
| всего<br>total | 10 | 4 | 8 | 5 | 9 | 36 |

Для гидрофобно-гидрофильного разреза получены промежуточные результаты с равномерным присутствуем различных типов динамики изменения $К_{прием}$. Анализ работы скважин, относящихся к участкам неоднородного геологического разреза, наиболее затруднен, так как даже относительно невысокая толщина работающего гидрофильного коллектора может являться определяющей в текущей динамике закачки скважин. Этим фактором также объяснимо, что для 25 % скважин (9 из 36) характерны резкие скачки без стабилизации приемистости в течение рассмотренного периода.

### Заключение

В результате проведенных исследований установлено, что по данным комплексирования методов бокового и микробокового электрического каротажа могут быть выделены площади развития битумизации и гидрофобизации коллекторов. Эксплуатация нагнетательных скважин на таких участках часто характеризуются пониженной приемистостью, что делает стандартное заводнение малоэффективным. Одним из путей оптимизации закачки является создание относительно длинных высокопроводящих каналов, позволяющих увеличить степень охвата пласта процессом вытеснения. Применение для этих целей большеобъемного пропантного гидроразрыва пласта [24–26] в низкопроницаемых битуминозных коллекторах ограничивается высокими экономическими рисками. Кроме этого, для визейских залежей создание высоких давлений разрыва может привести к прорывам флюидов через глинистую перемычку в нижележащие турне-фаменские карбонатные пласты.

Перспективным представляется применение на нагнетательных скважинах менее затратной, чем гидроразрыв, технологии радиального бурения [27–29]. Пока еще ограниченный опыт применения радиального бурения на визейских объектах Соликамской депрессии показал, что в добывающих скважинах наиболее высокий прирост дебитов нефти при значительной длительности эффекта получен для скважин именно с пониженными коллекторскими свойствами [30]. В частности, в результате применения радиального бурения на площади развития битуминозно-гидрофобных коллекторов (скважина на юге Юго-Восточного поднятия) прирост дебита по нефти составил 24 т/с, что более чем в 3 раза превышает стандартную эффективность.

В части поиска химических технологий повышения приемистости коллекторов гидрофобно-битуминозного типа целесообразно проведение опытно-промышленных работ по гидрофилизации пластов, например, с помощью применения поверхностно активных веществ. Дополнительный эффект вытеснения остаточной нефти при этом может быть получен за счет уменьшения капиллярных сил. Согласно мировой практике в условиях гидрофобных и малоглинистых песчаников для этих целей в качестве перспективной технологии может рассматриваться щелочное заводнение, которое в том числе ранее имело ограниченное применение на месторождениях Пермского региона [31]. Адсорбируясь на поверхности коллекторов, щелочь, помимо увеличения подвижности нефти, также снижает смачиваемость, что приводит к удалению из породы плохо растворимых веществ. Таким образом, для выявленных по данным каротажа зон развития гидрофобно-битуминозных коллекторов можно рекомендовать ряд перспективных технологий воздействия на пласт на основе физических и химических методов.

*Исследование выполнено в рамках государственного задания Минобрнауки РФ FSNM-2020-0027 на выполнение фундаментальных научных исследований на 2020 г. и плановый период 2021 и 2022 гг.*

### СПИСОК ЛИТЕРАТУРЫ

1. Михайлов Н.Н., Сечина Л.С., Ермилов О.М. Влияние асфальтенов на смачиваемость газонефтенасыщенных пород коллекторов // Доклады наук о Земле. – 2019. – Т. 486. – № 1. – С. 465–467.
2. Михайлов Н.Н., Ермилов О.М. Михайлов А.Н. Капиллярные граничные эффекты в резервуарах с гетерогенной смачиваемостью // Доклады наук о Земле. – 2020. – Т. 494. – № 1. – С. 680–683.
3. Особенности изучения смачиваемости сложнопостроенных карбонатных пород-коллекторов лабораторными методами / И.П. Гурбатова, С.В. Мелехин, Д.В. Чижов, Ю.В. Файрузова // Вестник Пермского национального исследовательского политехнического университета. Геология. Нефтегазовое и горное дело. – 2016. – Т. 15. – № 20. – С. 240–245. DOI: 10.15593/2224-9923/2016.20.4
4. Исследование гранулометрического состава битуминозных песчаников Ашальчинского месторождения методом рентгеновской микротомографии / Т.Р. Закиров, А.А. Галеев, Н.И. Жаркова, Е.О. Стаценко, Э.А. Королев, Л.И. Хайдарова // Нефтяное хозяйство. – 2016. – № 10. – С. 35–37.
5. Fracture evolution mechanism of hollow sandstone under conventional triaxial compression by X-ray micro-CT observations and three-dimensional numerical simulations / S. Yang, Z. Yang, H. Jing, T. Xu // International Journal of Solids and Structures. – 2020. – V. 190. – P. 156–180.
6. Estimation of heterogeneity of oil & gas field carbonate reservoirs by means of computer simulation of core x-ray tomography data / A.A. Efimov, S.V. Galkin, Ia.V. Savitckii, V.I. Galkin // Ecology. Environment and Conservation. – 2015. – V. 21. – P. 79–85.
7. Workflow for upscaling wettability from the nanoscale to core scale / M. Rucker, W. Bartels, T. Bultreys, M. Boone, K. Singh, G. Garfi, A. Scanziani, C. Spurin, S. Yesufu-Rufai, S. Krevor, M.J. Blunt, O. Wilson // Petrophysics. – 2020. – V. 61. – № 2. – P. 189–205.
8. Козырев Н.Д., Вишняков А.Ю., Путилов И.С. Оценка влияния параметров неопределенности на прогнозирование показателей разработки // Недропользование. – 2020. – Т. 20. – № 4. – С. 356–368. DOI: 10.15593/2712-8008/2020.4.5
9. Уточнение геолого-гидродинамической модели сложнопостроенной залежи нефти путем комплексного анализа данных / Н.Д. Козырев, А.А. Кочнев, А.Г. Менгалиев, И.С. Путилов, С.Н. Кривощеков // Известия Томского политехнического университета. Инжиниринг георесурсов. – 2020. – Т. 331. – № 10. – С. 164–177. DOI: 10.18799/24131830/2020/10/2866
10. Менгалиев А.Г., Мартюшев Д.А. Учет параметра анизотропии проницаемости в геолого-гидродинамических моделях карбонатных объектов (на примере Гагаринского месторождения) // Известия Томского политехнического университета. Инжиниринг георесурсов. – 2020. – Т. 331. – № 5. – С. 7–17. DOI: 10.18799/24131830/2020/5/2632
11. Сахибгареев Р.С. Вторичные изменения коллекторов в процессе формирования и разрушения нефтяных залежей. – Л.: Недра, 1989. –260 с.
12. Геохимические особенности и условия образования битумов в нефтяных залежах (на примере месторождений Татарстана) / Т.Н. Юсупова, Ю.М. Ганеева, Л.М. Петрова, Р.З. Мухаметшин, А.А. Галеев // Геология нефти и газа. – 2009. – № 2. – С. 52–59.
13. Dual neural network architecture for determining permeability and associated uncertainty / R. Kausik, A. Prado, V.-M. Gkortsas, L. Venkataramanan, H. Datir, Y.B. Johansen // Petrophysics. – 2021. – V. 62. – № 1. – P. 122–134.
14. Iskenderov M. Some results of modeling electrical resistivity (on the example of deposits of the South-Absheron aquatorium zone and the northern part of the Baku archipelago) // SOCAR Proceedings. – 2017. – V. 2. – № 2. – P. 4–12. DOI: 10.5510/OGP20170200310
15. Garcia A.P., Heidari Z., Rostami A. Improved assessment of hydrocarbon saturation in mixed-wet rocks with complex pore structure // Petrophysics. – 2017. – V. 58. – № 5. – P. 454–469.

16. Мухаметшин Р.З., Галеев А.А. Диагностика древних водонефтяных контактов инструментальными методами // Нефтяное хозяйство. – 2014. – № 10. – С. 28–33.
17. Study of wettability of reservoirs of oil fields by the method of x-ray tomography core / A. Efimov, Ya. Savitskiy, S. Galkin, E. Soboleva, V. Gurbanov // SOCAR Proceedings. – 2016. – V. 4. – № 4. – P. 55–63. DOI: 10.5510/OGP20160400298
18. Геологические факторы и диагностические признаки пород с негидрофильной смачиваемостью на месторождениях Тимано-печорской провинции / Т.Ф. Дьяконова, Л.К. Бата, А.Д. Саетгараев, Е.И. Бронскова // Каротажник. – 2021. – Т. 307. – № 1. – С. 19–30.
19. Опыт применения метода многозондового бокового каротажа / О.Л. Сальникова, А.В. Серкина, А.Д. Савич, А.С. Чухлов // Каротажник. – 2019. – Т. 299. – № 5. – С. 55–61.
20. Проявления и пути уменьшения влияния на показания приборов бокового электрического каротажа некоторых нежелательных эффектов / В.А. Клименко, Л.А. Книжнерман, В.М. Коровин, Т.Р. Салахов, М.Д. Хусид // Геофизика. – 2019. – № 3. – С. 54–59.
21. Клименко В.А., Салахов Т.Р. Опыт применения прибора пятизондового бокового каротажа высокого разрешения, сложная интерпретация // Геофизика. – 2018. – № 2. – С. 68–76.
22. Галкин С.В., Колычев И.Ю., Савицкий Я.В. Возможности исследования гидрофобизации коллекторов комплексированием методами рентгеновской томографии керна и электрического каротажа // Геология и геофизика. – 2019. – № 10. – С. 1496–1507. DOI: 10.15372/GiG2019094
23. Сметкина М.А., Мелкишев О.А., Присяжнюк М.А. Уточнение значений проницаемости при адаптации гидродинамической модели // Недропользование. – 2020. – Т. 20. – № 3. – С. 223–230. DOI: 10.15593/2712-8008/2020.3.3
24. Patel S., Sondergeld C., Rai C. Laboratory studies of hydraulic fracturing by cyclic injection // International Journal of Rock Mechanics and Mining Sciences. – 2017. – V. 95. – P. 8–15.
25. Yuan J., Jiang R., Zhang W. The workflow to analyze hydraulic fracture effect on hydraulic fractured horizontal well production in composite formation system // Advances in GeoEnergy Research. – 2018. – V. 2. – № 3. – P. 319–342.
26. An environment friendly approach to reduce the breakdown pressure of high strength unconventional rocks by cyclic hydraulic fracturing / Z. Tariq, M. Mahmoud, A. Abdulraheem, D. Al-Shehri, M. Murtaza // Journal of Energy Resources Technology. – 2020. – V. 142. – № 4. – Article 043002.
27. Insights into the radial water jet drilling technology – application in a quarry / T. Reinsch, B. Paap, S. Hahn, V. Wittig, S. van den Berg // Journal of Rock Mechanics and Geotechnical Engineering. – 2018. – V. 10. – Iss. 2. – P. 236–248.
28. Application of machine learning algorithms to predict the effectiveness of radial jet drilling technology in various geological conditions / A. Kochnev, S. Galkin, S. Krivoshchekov, N. Kozyrev, P. Chalova // Applied Sciences (Switzerland). – 2021. – V. 11. – Article 4487. DOI: 10.3390/app11104487.
29. Maximum drillable length of the radial horizontal micro-hole drilled with multiple high-pressure water jets / H. Chi, G. Li, Z. Huang, S. Tian, X. Song // Journal of Natural Gas Science and Engineering. – 2015. – V. 26. – P. 1042–1049.
30. Кочнев А.А., Зотиков В.И., Галкин С.В. Анализ влияния геолого-технологических показателей на эффективность технологии радиального бурения на примере эксплуатационных объектов Пермского края // Известия Томского политехнического университета. Инжиниринг георесурсов. – 2018. – Т. 329. – № 12. – С. 20–29. DOI: 10.18799/24131830/2018/12/16
31. Оценка результатов щелочного заводнения в Пермском крае / И.Р. Юшков, А.А. Ерофеев, А.И. Юшков, А.А. Злобин // Нефтепромысловое дело. – 2013. – № 9. – С. 57–63.

*Поступила 01.12.2021 г.*

**Информация об авторах**

***Галкин С.В.***, доктор геолого-минералогических наук, профессор, декан горно-нефтяного факультета Пермского национального исследовательского политехнического университета.

***Колычев И.Ю.***, кандидат технических наук, научный сотрудник кафедры нефтегазовых технологий Пермского национального исследовательского политехнического университета.

***Ракинцев В.А.***, инженер в области мониторинга и проектирования разработки нефтяных и газовых месторождений, филиал ООО «ЛУКОЙЛ-Инжиниринг» «ПермНИПИнефть» в г. Перми.

UDC 552.086

# POSSIBILITIES OF DETERMINING THE TYPE OF WETTABILITY OF THE COLLECTORS BY LOGGING DATA WHEN OPTIMIZING THE SYSTEM OF FLOODING OF OIL RESERVOIRS

**Sergey V. Galkin[1],**
doc_galkin@mail.ru

**Igor Yu. Kolychev[1],**
igorek999@yandex.ru

**Vladimir A. Rakintsev[3],**
rakintsevv.a@mail.ru

[1] Perm National Research Polytechnic University,
29, Komsomolsky avenue, Perm, 614990, Russia.

[2] Branch of LLC LUKOIL-Engineering «PermNIPIneft» in Perm,
3a, Permskaya street, Perm, 614015, Russia.

***The relevance.*** *The wettability of oil-saturated reservoirs significantly affects the technological features of the development of production facilities, primarily the efficiency of waterflooding of oil reservoirs. Possibilities of determining the wettability of reservoirs based on the data of geophysical studies of wells make it possible to take this indicator into account in geological and technological modeling of the development of oil fields, including when optimizing waterflooding of oil reservoirs. This problem was solved for the conditions of terrigenous oil-saturated reservoirs, for which it is based on the integration of reservoir porosity, lateral electrical logging and micro-lateral logging. The publication presents the results and analysis of the dynamics of injectivity of injection wells in the conditions of the development of bituminous, hydrophobized and hydrophilic reservoirs. For areas with low injectivity of wells, geological and technical measures were proposed to optimize the waterflooding system for oil reservoirs.*
***Object:*** *oil-saturated reservoirs of the Visean oil deposits of the Solikamsk depression (Perm region).*
***Method:*** *development of a methodology and determination of the type of wettability and the degree of bitumization of terrigenous reservoirs based on the data of gamma-ray logging, lateral electric logging and micro-side logging; analysis of the dynamics of injectivity of injection wells for various identified types of wettability.*
***Results.*** *Based on the developed methodology, the authors have obtained zoning schemes for development of hydrophobization and bituminization of oil-saturated reservoirs for the Tl-Bb object of the Unvinskoe field. The analysis of the dynamics of the operation of injection wells for the conditions of a bituminous, hydrophobized and hydrophilic geological section is carried out. The schemes of zoning of development of hydrophobization and bitumization processes of reservoirs, which are associated with areas of decreased injectivity of injection wells, were constructed. Geological and technical measures are proposed to optimize the waterflooding system for oil reservoirs in hydrophobic-bituminous reservoirs.*

***Key words:***
*Wettability, hydrophobic reservoir, bituminization, well logging, specific electrical resistance, lateral logging, flooding of oil reservoirs.*

*The study was carried out within the framework of the state task of the Ministry of Science and Higher Education of Russian Federation FSNM-2020-0027 for the implementation of fundamental scientific research.*

## REFERENCES

1. Mikhailov N.N., Sechina L.S., Ermilov O.M. Effect of asphaltenes on wettability of gas and oil saturated reservoir rocks. *Doklady Earth Sciences*, 2019, vol. 486, no. 1, pp. 465–467. In Rus.
2. Mikhailov N.N., Ermilov O.M., Mikhailov A.N. Capillary end effects in reservoirs with heterogeneous wettability. *Doklady Earth Sciences*, 2020, vol. 494, no. 1, pp. 680–683. In Rus.
3. Gurbatova I.P., Melekhin S.V., Chizhov D.B., Fairuzova Yu.V. Features of study complex carbonate reservoir rocks` wetting using laboratory methods. *Bulletin of Perm National Research Polytechnic University. Geology. Oil & Gas Engineering & Mining*, 2016, vol. 15, no. 20, pp. 240–245. In Rus.
4. Zakirov T.R., Galeev A.A., Zharkova N., Statsenko E.O., Korolev E.A., Khaidarova L.I. X-ray microtomography and grain size analysis of bituminous sandstones from ashalchinskoye oil field. *Oil industry*, 2016, no. 10, pp. 35–37. In Rus.
5. Yang S., Yang Z., Jing H., Xu T. Fracture evolution mechanism of hollow sandstone under conventional triaxial compression by X-ray micro-CT observations and three-dimensional numerical simulations. *International Journal of Solids and Structures*, 2020, vol. 190, pp. 156–180.
6. Efimov A.A., Galkin S.V., Savitckii Ia.V., Galkin V.I. Estimation of heterogeneity of oil & gas field carbonate reservoirs by means of computer simulation of core x-ray tomography data. Ecology. *Environment and Conservation*, 2015, vol. 21, pp. 79–85.
7. Rucker M., Bartels W., Bultreys T., Boone M., Singh K., Garfi G., Scanziani A., Spurin C., Yesufu-Rufai S., Krevor S., Blunt M.J., Wilson O. Workflow for upscaling wettability from the nanoscale to core scale. *Petrophysics*, 2020, vol. 61, no. 2, pp. 189–205.
8. Kozyrev N.D., Vishnyakov A.Yu., Putilov I.S. Assessment of the uncertainty parameters influence on the development indicators forecasting. *Perm Journal of Petroleum and Mining Engineering*, 2020, vol. 20, no. 4, pp. 356–368. In Rus.
9. Kozyrev N.D., Kochnev A.A., Mengaliev A.G., Putilov I.S., Krivoshchekov S.N. Refinement of the geological and hydrodynamic model of a complex oil reservoir by means of a comprehensive data analysis. *Bulletin of the Tomsk Polytechnic University. Geo Assets Engineering*, 2020, vol. 10, no. 331, pp. 164–177. In Rus.
10. Mengaliev A.G., Martyushev D.A. Accounting the parameter of anisotropy of permeability in geological and hydrodynamic models of carbonate objects (On the example of the Gagarin deposit). *Bulletin of the Tomsk Polytechnic University. Geo Assets Engineering*, 2020, vol. 5, no. 331, pp. 7–17. In Rus.

11. Sakhibgareev R.S. *Vtorichnye izmeneniya kollektorov v protsesse formirovaniya i razrusheniya neftyanykh zalezhey* [Secondary reservoir changes in the process of formation and destruction of oil deposits]. Leningrad, Nedra Publ., 1989. 260 p.
12. Yusupova T.N., Ganeeva Yu.M., Petrova L.M., Mukhametshin R.Z., Galeev A.A. Geochemical features and formation conditions of bitumen in oil pools (with reference to tatarstan's fields). *Geologiya Nefti i Gaza*, 2009, no. 2, pp. 52–59. In Rus.
13. Kausik R., Prado A., Gkortsas V.-M., Venkataramanan L., Datir H., Johansen Y.B. Dual neural network architecture for determining permeability and associated uncertainty. *Petrophysics*, 2021, vol. 62, no. 1, pp. 122–134.
14. Iskenderov M. Some results of modeling electrical resistivity (on the example of deposits of the South-Absheron aquatorium zone and the northern part of the Baku archipelago). *SOCAR Proceedings*, 2017, vol. 2, no. 2, pp. 4–12.
15. Garcia A.P., Heidari Z., Rostami A. Improved assessment of hydrocarbon saturation in mixed-wet rocks with complex pore structure. *Petrophysics*, 2017, vol. 58, no. 5, pp. 454–469.
16. Mukhametshin R.Z., Galeev A.A. Diagnostics of ancient oil-water contacts by instrumental methods. *Oil industry*, 2014, no. 10, pp. 28–33. In Rus.
17. Efimov A., Savitskiy Ya., Galkin S., Soboleva E., Gurbanov V. Study of wettability of reservoirs of oil fields by the method of X-ray tomography core. *SOCAR Proceedings*, 2016, vol. 4, no. 4, pp. 55–63.
18. Diakonova T.F., Bata L.K., Saetgaraev A.D., Bronskova E.I. Geological factors and diagnostic signs of non-water-wetting rocks in Timan-pechora province fields. *Well Logger*, 2021, vol. 307, no. 1, pp. 19–30. In Rus.
19. Salnikova O.L., Serkina A.V., Savich A.D., Chukhiov A.S. An experience of applying the method of multisonde lateral logging. *Well Logger*, 2019, vol. 299, no. 5, pp. 55–61. In Rus.
20. Klimenko V.A., Knizhnerman L.A., Korovin V.M., Salahov T.R., Khusid M.D. Manifestation and methods of reduction of some unwanted effects on the laterolog tools' well-logging curves. *Geofizika*, 2019, no. 3, pp. 54–59. In Rus.
21. Klimenko V.A. Salahov T.R. Experience of the high resolution five-sondes laterolog tool, complex interpretation. *Geofizika*, 2018, no. 2, pp. 46–51. In Rus.
22. Galkin S.V., Kolychev I.J., Savitskiy Ya.V. Potentialities of investigation of reservoir hydrophobization by compilation of X-ray core tomography and lateral logging. *Russian Geology and Geophysics*, 2019, no. 10, pp. 1496–1507. In Rus.
23. Smetkina M.A., Melkishev O.A., Prisyazhnyuk M.A. Refining the values of permeability when adapting the hydrodynamic model. *Perm Journal of Petroleum and Mining Engineering*, 2020, vol. 20, no. 3, pp. 223–230. In Rus.
24. Patel S., Sondergeld C., Rai C. Laboratory studies of hydraulic fracturing by cyclic injection. *International Journal of Rock Mechanics and Mining Sciences*, 2017, vol. 95, pp. 8–15.
25. Yuan J., Jiang R., Zhang W. The workflow to analyze hydraulic fracture effect on hydraulic fractured horizontal well production in composite formation system. *Advances in GeoEnergy Research*, 2018, vol. 2, no. 3, pp. 319–342.
26. Tariq Z., Mahmoud M., Abdulraheem A., Al-Shehri D., Murtaza M. An environment friendly approach to reduce the breakdown pressure of high strength unconventional rocks by cyclic hydraulic fracturing. *Journal of Energy Resources Technology*, 2020, vol. 142, no. 4, article 043002.
27. Reinsch T., Paap B., Hahn S., Wittig V., van den Berg S. Insights into the radial water jet drilling technology – application in a quarry. *Journal of Rock Mechanics and Geotechnical Engineering*, 2018, vol. 10, Iss. 2, pp. 236–248.
28. Kochnev A., Galkin S., Krivoshchekov S., Kozyrev N., Chalova P. Application of machine learning algorithms to predict the effectiveness of radial jet drilling technology in various geological conditions. *Applied Sciences (Switzerland)*, 2021, vol. 11, article 4487.
29. Chi H., Li G., Huang Z., Tian S., Song X. Maximum drillable length of the radial horizontal micro-hole drilled with multiple high-pressure water jets. *Journal of Natural Gas Science and Engineering*, 2015, vol. 26, pp. 1042–1049.
30. Kochnev A.A., Zotikov V.I., Galkin S.V. Analysis of the influence of geological technological parameters on the effectiveness of radial drilling technology on the example of operational objects in perm region. *Bulletin of the Tomsk Polytechnic University. Geo Assets Engineering*, 2018, vol. 329, no. 12, pp. 20–29. In Rus.
31. Yushkov I.R., Erofeev A.A., Yushkov A.I., Zlobin A.A. Evaluation of results of alkaline flooding in perm region. *Oilfield engineering*, 2013, no. 9, pp. 57–63. In Rus.


*Received: 1 December 2021.*

**Information about the authors**

***Sergey V. Galkin***, Dr. Sc., professor, dean of the Mining-Oil Faculty, Perm National Research Polytechnic University.

***Igor Yu. Kolychev***, Cand. Sc., researcher, Perm National Research Polytechnic University.

***Vladimir A. Rakintsev***, engineer in the field of monitoring and design of oil and gas fields development, branch of LLC LUKOIL-Engineering «PermNIPIneft» in Perm.

УДК 550.4:550.43

# РАДИОАКТИВНЫЕ (TH, U) И РЕДКОЗЕМЕЛЬНЫЕ ЭЛЕМЕНТЫ В ПРИРОДНЫХ ВОДАХ ЦЕНТРАЛЬНОГО СИХОТЭ-АЛИНЯ (ПРИМОРСКИЙ КРАЙ)

**Ветошкина Алена Владимировна**[1],
vetoshkina.alena@mail.ru

**Чекрыжов Игорь Юрьевич**[1],
chekr2004@mail.ru

**Паничев Александр Михайлович**[2],
sikhote@mail.ru

**Вах Елена Александровна**[3],
adasea@mail.ru

**Барановская Наталья Владимировна**[4],
nata@tpu.ru

**Луценко Татьяна Николаевна**[2],
lutsenko53@bk.ru

[1] Дальневосточный геологический институт ДВО РАН,
Россия, 690022, г. Владивосток, пр. 100-лет Владивостоку, 159.

[2] Тихоокеанский институт географии ДВО РАН,
Россия, 690041, г. Владивосток, ул. Радио, 7.

[3] Тихоокеанский институт океанологии им. Ильичева ДВО РАН,
Россия, 690041, г. Владивосток, ул. Балтийская, 43.

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

***Актуальность.*** *Сложная картина баланса Th и U, взаимосвязь их с редкоземельными элементами в природных водах различного состава и важность этих элементов как индикаторов для гидрогеохимических построений и выводов определяет актуальность их изучения в разных регионах с использованием современных аналитических методов.*
***Цель:*** *рассмотреть баланс тория и урана и взаимосвязи радиоактивных и редкоземельных элементов в природных водах центрального Сихотэ-Алиня (Приморский край).*
***Объекты:*** *содержание и баланс урана и тория в природных водах трех районов центрального Сихотэ-Алиня в Приморском крае: «Шандуй», «Ванчин», «Бикин».*
***Методы.*** *55 элементов определены методом масс-спектрометрии с индуктивно связанной плазмой (ICP-MS) (спектрометр Agilent 7700x, Agilent Techn., США). Вторая пробирка использовалась для определения пяти макрокатионов атомно-эмиссионной спектрометрией (спектрометр iCAP 7600 Duo), а также шести анионов ионной хроматографией (ионно-жидкостный хроматограф LC-20, Shimadzu, Япония).*
***Результаты.*** *Приводятся новые данные по содержанию радиоактивных элементов (тория и урана), величине Th/U, содержанию РЗЭ в природных водах, приуроченных к расположению кудуров (специфических мест проявления литофагии) в трех районах, находящихся территориально в центральном Сихотэ-Алине Приморского края: «Шандуй», «Ванчин», «Бикин». Установлены средние содержания радиоактивных (Th, U) и редкоземельных (La, Ce, Pr, Nd, Pm, Sm, Eu, Gd, Tb, Dy, Ho, Er, Tm, Yb, Lu) элементов в природных водах. Исследуемые природные воды относятся к ультрапресным и пресным, со средней минерализацией 52,4 мг/л. Содержание U в водах колеблется от 0,005 до 1,067 мкг/л. Концентрация Th в воде колеблется от 0,003 до 2,299 мкг/л. Соотношение торий–уран в водах колеблется от 0,01 до 5,3. Отмечается положительная зависимость между содержанием тория в водах и количеством редкоземельных элементов в пресных водах. Спектр распределения редкоземельных элементов в природных водах, вероятно, наследуется из дренируемых цеолитизированных и оглиненных кислых пород.*

***Ключевые слова:***
*Редкоземельные и радиоактивные элементы, природные воды, солонцы, кудуры, индикаторные показатели, соотношения элементов, Приморский край, Сихотэ-Алинь.*

## Введение

В результате массового внедрения в аналитические работы метода масс-спектрометрии с индуктивно-связанной плазмой (ICP-MS) и других современных методов стало возможным одновременное и прецизионное определение содержания радиоактивных (уран и торий) и редкоземельных (лантаноиды и иттрий) элементов в водах. С.Л. Шварцев в своей обобщающей работе [1] привел сводные данные по абсолютным содержаниям этих элементов в воде. На основе этих данных С.И. Арбузовым и Л.П. Рихвановым [2] были рассчитаны показатели торий-

уранового отношения как важного геохимического индикатора этих родственных химических элементов, поведение которых близко в эндогенных магматических и высокотемпературных флюидных процессах. Предполагается общая закономерность в распространении тория и урана, поскольку величина торий-уранового отношения изменяется для разных образований в пределах Солнечной системы в узком интервале значений и выдерживается во многих горных породах. Однако строгое соотношение не выдерживается в динамично изменяющихся системах с участием воды. Основными параметрами, решающими в миграционном процессе, являются формы нахождения элементов и ландшафтно-геохимические условия природной среды [3]. Современные оценки растворенной части этих элементов в речных водах говорят о преобладании U в воде, но в то же время исследователями приводятся примеры водных источников, в которых содержание Th больше, чем U. Так, например, отношение Th к U (Th/U) в поверхностных водах некоторых районов Сибири колеблется от 0,01 до 5,24 [4, 5]. В терминах радиогеохимии можно сказать, что природа радиоактивности воды колеблется от урановой (Th/U<1), смешанной торий-урановой до ториевой (Th/U>5) [2]. В свою очередь, редкоземельные элементы (РЗЭ, в англоязычной литературе REE) также широко используются в геохимии для решения принципиальных вопросов реконструкции характера геологических процессов, источников вещества, геодинамических обстановок формирования горных пород и месторождений полезных ископаемых. Исследованные водные объекты приурочены к местам распространения литофагиальной активности диких животных – кудуров. Предполагается, что литофагиальная активность обуславливается, в том числе, и высоким содержанием РЗЭ в природных средах данных районов. Сложная картина баланса Th и U, взаимосвязь их с РЗЭ в природных водах различного состава и важность этих элементов как индикаторов для гидрогеохимических построений и выводов определяет актуальность их изучения в разных регионах с использованием современных аналитических методов.

К РЗЭ, или лантаноидам, относятся 15 элементов периодической системы химических элементов Д.И. Менделеева (лантаноиды): La, Ce, Pr, Nd, Pm, Sm, Eu, Gd, Dy, Ho, Tb, Er, Tm, Yb, Lu, а также Y и Sc. В данной статье мы используем деление лантаноидов на две подгруппы: легкие (LREE) – La, Ce, Pr, Nd, Pm, Sm, Eu, и тяжелые (HREE) – Gd, Tb, Dy, Ho, Er, Tm, Yb, Lu [6]. Так как ранее при анализе сумм РЗЭ в водах Y и Sc не учитывались, мы также их не брали в расчет, чтобы полученные данные можно было сопоставлять с данными предшественников. Также из списка изученных лантаноидов исключен Pm, как практически не встречающийся в природе и не определяемый стандартными методами элемент.

Цель настоящих исследований: рассмотреть баланс тория и урана и взаимосвязи радиоактивных и редкоземельных элементов в природных водах центрального Сихотэ-Алиня (Приморский край).

**Краткая характеристика исследованных районов**

В настоящей статье рассматривается содержание РЗЭ и баланс урана и тория в природных водах трех районов центрального Сихотэ-Алиня на территории Приморского края (рис. 1).

***Рис. 1.*** *Местоположение районов исследования: 1 – «Бикин»; 2 – «Шандуй»; 3 – «Ванчин»*

***Fig. 1.*** *Location of study areas: 1 – «Bikin»; 2 – «Shanduy»; 3 – «Vanchin»*

Выбор для исследований именно этих районов был обусловлен наличием на их территории многочисленных природных солонцов – кудуров, поскольку работы проводились в рамках междисциплинарного проекта РНФ «Влияние литолого-геохимической специфики горных ландшафтов Сибири и Дальнего Востока на формирование элементного состава организма млекопитающих». Кудуры – это геолого-ландшафтные комплексы, которые регулярно посещают дикие животные с целью употребления горных пород и минерализованных родниковых вод; следовательно, кудуриты – это литогенные вещества, потребляемые животными на кудурах [7]. Исследования последних лет показали, что районы, где распространены кудуры, представляют собой ландшафтные редкоземельные аномалии, как правило, связанные с метасоматически измененными и оглиненными кислыми кайнозойскими вулканитами и минерализованными водами [8, 9].

Первый исследованный район (далее по тексту – район «Бикин») находится на водоразделе между верховьями рек Бикин и Максимовка, в юго-восточной части национального парка Бикин, в пределах Верхнебикинской палеовулканоструктуры, сложенной преимущественно кислыми вулканитами верхнемелового и раннекайнозойского возраста. В меньшей степени на площади участка распространены среднекайнозойские вулканиты контрастной серии, а также вулканогенно-осадочные и осадочные слабоугленосные отложения. На площади участка отмечены отдельные проявления золота, олова и полиметаллов.

Второй район (далее по тексту – район «Шандуй») расположен в центральной части хребта Сихотэ-Алинь, на северо-восточной части территории Сихотэ-Алинского государственного биосферного заповедника, и включает г. Солонцовая (Шандуй), верховья р. Заболоченной и правых притоков р. Таежной. Гора Солонцовая и ее окрестности являются руинами палеоценового Солонцовского (Шандуйского) палеовулкана и сложены кислыми и средними вулканитами с резким преобладанием их пирокластических разновидностей. Рудная минерализация представлена проявлениями золота и серебра [10].

Третий район исследований (далее – район «Ванчин») находится в южной части горного хребта Сихотэ-Алинь, на территории национального парка «Зов тигра», и охватывает бассейн верховьев р. Милоградовка (Ванчин). Большая часть исследованного района находится в пределах р. Угольного (правый приток Милоградовки), дренирующего отложения Ванчинской вулкано-тектонической угленосной впадины. Впадина образовалась в раннем кайнозое и заполнена вулканогенно-осадочными и терригенными отложениями преимущественно палеоценового и эоценового возраста с маломощными пластами бурых углей. В северо-восточной части к впадине подступает среднегорье с отметками до 1305 м (г. Фасольная), сложенное преимущественно верхнемеловыми и раннекайнозойскими вулканитами. Характерной особенностью этого района является наличие многочисленных рудопроявлений золота, серебра, олова, полиметаллов, а также германиевой и уникальной редкоземельной минерализации в углях [11, 12].

### Материалы и методы

Материалы для исследований были получены в рамках полевых работ в июле и сентябре 2020 г. Всего в трех исследованных районах было отобрано 123 пробы воды из местных водотоков и родников, в том числе на источниках, приуроченных к природным солонцам – кудурам. Вода отбиралась в полиэтиленовые емкости 250 мл, которые во время полевых работ (не более 5 суток) хранились в автомобильном холодильнике. Подготовка проб воды к анализам выполнялась в лаборатории геохимии Тихоокеанского института географии ДВО РАН. В нефильтрованной пробе измерялась электропроводность и выполнялись определения pH и общей щелочности, предполагалось, что она обусловлена присутствием $HCO_3^-$. Каждая проба фильтровалась через мембранный фильтр (0,45 микрон) с помощью вакуумного насоса и разливалась в две пробирки (полипропилен) емкостью 50 мл. Далее пробы воды, разлитые на две одинаковые пробирки, направлялись в Аналитический центр коллективного пользования при Дальневосточном геологическом институте ДВО РАН. Одна из пробирок после подкисления воды особо чистой азотной кислотой шла на определение (состава) концентраций 55 элементов методом масспектрометрии с индуктивно связанной плазмой (ИСП-МС) (спектрометр Agilent 7700x, Agilent Techn., США). Вторая пробирка шла на определение пяти макрокатионов методом атомно-эмиссионной спектрометрии (спектрометр iCAP 7600 Duo), а также шести анионов методом ионной хроматографии (ионный жидкостный хроматограф LC-20, Shimadzu, Япония). Общая минерализация воды (∑n) определялась как сумма макрокомпонентов: $\sum n=[Na^+]+[K^+]+[Ca^{2+}]+[Mg^{2+}]+[Si^{4+}]+[SO_4^{2-}]+[Cl^-]+[HCO_3^-]$. Содержание растворенного органического углерода выполняли из фильтрованной пробы на анализаторе TOCvcpn (Shimadzu) методом термокаталитического окисления.

Для интерпретации и анализа данных проводился стандартный анализ среднестатистических параметров с использованием программы Excel, SigmaPlot 12.0. Для построения диаграммы Пайпера использовалась программа AquaChem 5.1.

Для выявления индикаторных показателей использовались соотношения элементов: Th/U, LREE/HREE, а также сумма редкоземельных элементов: ∑РЗЭ=La+Ce+Pr+Nd+Sm+Eu+Gd+Dy+Ho+Tb+Er+Yb+Lu.

При интерпретации геохимических исследований широко распространено нормирование содержаний РЗЭ к их содержанию в эталонных образцах с целью определения процессов фракционирования элементов в различных физико-химических условиях [13]. В настоящих исследованиях содержание РЗЭ мы нормировали на североамериканский сланец (NASC) [14, 15].

### Результаты и обсуждение

Все изученные водотоки в трех районах являются ультрапресными и пресными с минерализацией не более 280 мг/л, преимущественно ультрапресными со средней минерализацией 52,4 мг/л. Содержание РЗЭ имеет в водах большую вариабельность – так, сумма всех РЗЭ в воде изменяется от 0,033 до 31,33 мкг/л. Содержание U в водах колеблется от минимального значения 0,005, достигая максимального 1,067 мкг/л. Концентрация Th в воде также имеет широкий разброс значений от 0,003 до 2,299 мкг/л. Торий-урановое отношение в водах изменяется в пределах от 0,01 до 5,3 (табл. 1). Рассмотрим изменение содержания компонентов более подробно по районам исследования.

Поверхностные воды района «Бикин» гидрокарбонатные, по катионному составу преобладают натриево-магниево-кальциевые (рис. 2). Воды преимущественно ультрапресные, пресные с максимальной минерализацией до 278 мг/л. По показателю pH воды от нейтральных до слабощелочных: 6,45–7,9.

Содержание урана в природных водах района «Бикин» изменяется от 0,006 до 0,336 мкг/л при его среднем содержании 0,059 мкг/л (табл. 1). Содержание тория колеблется от 0,003 до 0,416 мкг/л, средняя концентрация составляет 0,032 мкг/л. Th/U изменяется от 0,01, достигая максимального значения 4,6, в среднем составляет 0,7. Изменение концентрации тория в воде заметно коррелирует (коэффициент корреляции Пирсона 0,7) с распределением редкоземельных элементов в воде.

***Таблица 1.*** *Распространенность РЗЭ и радиоактивных элементов (урана и тория) в природных водах исследованных районов [17]*

***Table 1.*** *Abundance of REE and radioactive elements (uranium and thorium) in natural waters of the studied areas [17]*

| Район исследования Research area | pH | Параметры Parametres | Минерализация, мг/л Mineralization, mg/l | Сумма РЗЭ, мкг/л REE amount, μg/l | LREE | HREE | Th | U | Th/U |
|---|---|---|---|---|---|---|---|---|---|
| | | | | | % | | мкг/л/μg/l | | |
| Район «Бикин» «Bikin» area | 6,45–7,9 | минимум minimum | 32,2 | 0,03 | 66 | 14 | 0,003 | 0,006 | 0,01 |
| | | максимум maximum | 278,5 | 6,73 | 86 | 35 | 0,416 | 0,336 | 4,6 |
| | | среднее mean | 80,7 | 0,67 | 75 | 25 | 0,032 | 0,059 | 0,7 |
| | | медиана median | 65,7 | 0,35 | 74 | 26 | 0,015 | 0,038 | 0,4 |
| | | число проб number of samples | 43 | 43 | 43 | 43 | 43 | 43 | 43 |
| Район «Шандуй» «Shanduy» area | 6,0–7,46 | минимум minimum | 20,8 | 0,20 | 57 | 9 | 0,006 | 0,018 | 0,2 |
| | | максимум maximum | 65,1 | 96,73 | 91 | 43 | 10,01 | 1,738 | 5,8 |
| | | среднее mean | 38,8 | 5,49 | 72 | 28 | 0,534 | 0,214 | 1,0 |
| | | медиана median | 37,4 | 0,81 | 73 | 27 | 0,03 | 0,060 | 0,7 |
| | | число проб number of samples | 24 | 24 | 24 | 24 | 24 | 24 | 24 |
| Район «Ванчин» «Vanchin» area | 3,5–7,0 | минимум minimum | 6,0 | 0,08 | 66 | 13 | 0,004 | 0,005 | 0,3 |
| | | максимум maximum | 134,6 | 31,33 | 87 | 34 | 2,299 | 0,720 | 5,4 |
| | | среднее mean | 36,2 | 2,97 | 78 | 22 | 0,201 | 0,086 | 2,1 |
| | | медиана median | 31,5 | 1,45 | 78 | 22 | 0,083 | 0,035 | 2,2 |
| | | число проб number of samples | 56 | 56 | 56 | 56 | 56 | 56 | 56 |

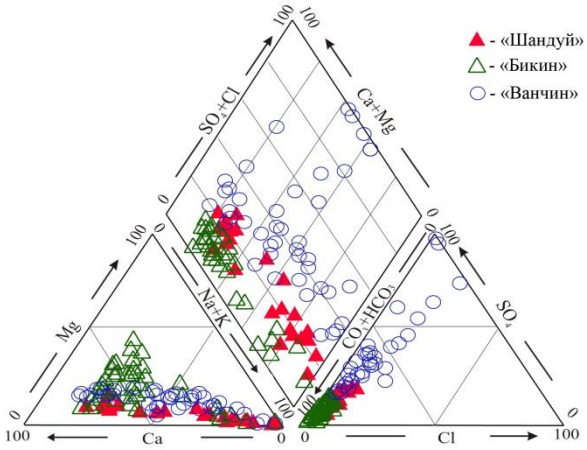



***Рис. 2.*** *Диаграмма Пайпера для вод обследованных районов, по [16] с дополнениями*

***Fig. 2.*** *Piper diagram for the waters of the surveyed areas [16]*

В целом в водах района исследований «Бикин» содержание урана в природных водах выше, чем содержание тория. Максимальные Th/U отношения отмечены в водах: левого притока руч. Буреломный (4,5); устья р. Лосевка и устья 5-го сверху ключа справа по р. Пещерка (2,2); устья 3-го левого ключа сверху по р. Правая Пещерка (1,6); устьев руч. Солонцовый и Староверский, ручья на солонце Неожиданный (1,2); правого притока руч. Староверский (1,01); ручья на солонце Директорский (1,0).

В спектрах распределения РЗЭ для исследованного района «Бикин» отсутствует четкая дифференциация между обогащением легкими и тяжелыми РЗЭ (рис. 3). Сумма РЗЭ в водах района «Бикин» изменяется от 0,003 до 6,73 мкг/л при среднем значении 0,67 мкг/л, медианное значение составляет 0,5 мкг/л (табл. 1). На долю LREE приходится в среднем 75 %, на HREE – 25 %. Для слабощелочных вод района исследований характерны спектры распределения РЗЭ как с сильно («Б-19» – ручей Правая Лосевка, верховья и «Б-2» из ключа, приток р. Правая Пещерка с минимальными содержаниями РЗЭ), так и со слабовыраженным Eu максимумом и Ce минимумом. Максимальные значения РЗЭ для проб района исследований «Бикин» содержатся в пробах «Б-17» (ручей на солонце Неожиданный) и «Б-20» (левый приток руч. Директорский), спектры имеют картину распределения РЗЭ с выраженными Eu и Ce минимумами.

Поверхностные воды района исследований «Шандуй» также ультрапресные, значения минерализации изменяются от 20,8 до 65,1 мг/л; по показателю pH воды нейтральные: pH от 6,00 до 7,46. По макрокомпонентному составу воды натриево-кальциевые гидрокарбонатные, но также встречаются чисто натриевые воды (рис. 2). Содержание урана в природных водах района «Шандуй» изменяется от 0,018 до 1,738 мкг/л при его среднем содержании 0,214 мкг/л. Содержание тория колеблется от 0,0065 до 10,01 мкг/л, средняя концентрация составляет 0,534 мкг/л. Торий-урановое отношение в водах изменяется от 0,2 до 5,8 при среднем значении отношения 1,0. Так же как в водах района «Бикин» здесь прослеживается весьма высокая корреляция между содержанием тория и РЗЭ в воде (коэффициент корреляции Пирсона 0,96) (рис. 4).

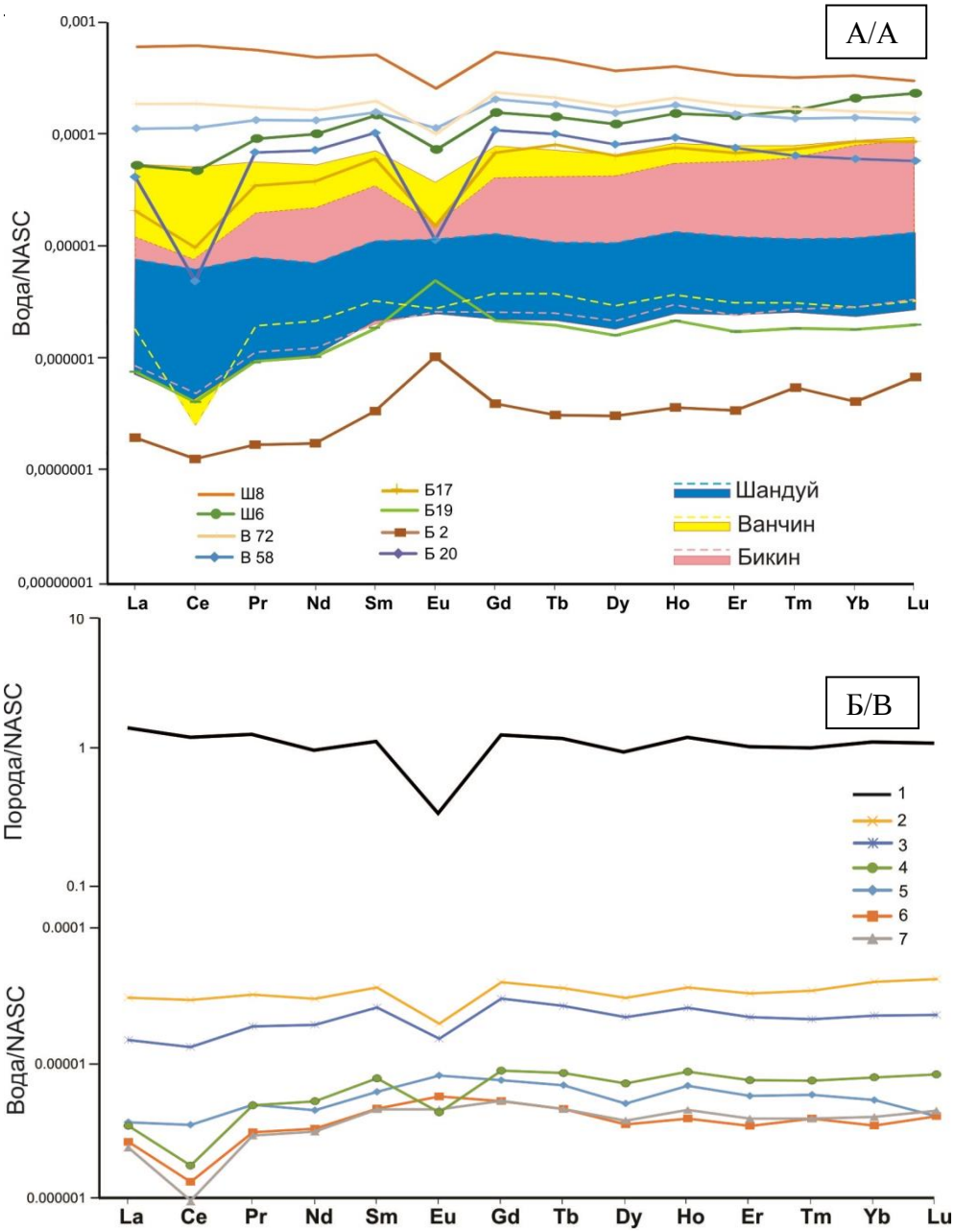



***Рис. 3.*** *А) спектры распределения РЗЭ в водах исследованных районов; Б) профили распределения средних концентраций NASC-нормированных РЗЭ (по [15]) в водных пробах и пробах туфов исследованных районов в сравнении со средними показателями рек мира (по [18]), рек Приморского края (по [19]) и восточного макросклона Сихотэ-Алиня (по [19]). 1 – порода; средние содержания в пробах воды: 2 – «Шандуй», 3 – «Ванчин», 4 – «Бикин», 5 – по миру, 6 – по Приморскому краю, 7 – по Восточному макросклону Сихотэ-Алиня*

***Fig. 3.*** *A) spectra of REE distribution in the waters of the studied areas; B) profiles of distribution of average concentrations of NASC-normalized REE [15] in water samples of the studied regions in comparison with the average indicators of the world's rivers ([18]), rivers of Primorsky Krai (according to [19]) and the eastern macroslope of the Sikhote-Alin ( [19]). 1 – rock; average contents in water samples: 2 – «Shanduy», 3 – «Vanchin», 4 – «Bikin», 5 – the world, 6 – the Primorsky Krai, 7 – the Eastern Macroslope of Sikhote-Alin*

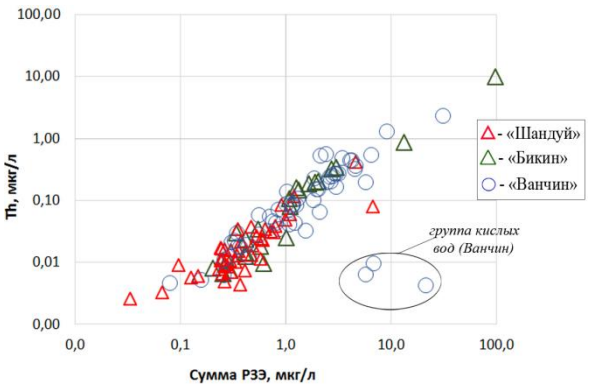



***Рис. 4.*** *Зависимость распределения тория от суммы РЗЭ в водах исследованных районов*

***Fig. 4.*** *Dependence of thorium distribution on REE amount in the waters of the studied areas*

Спектры распределения РЗЭ для исследованного района «Шандуй» для большинства проб идентичны (рис. 3). Кривые распределения характеризуются выраженными Eu и Ce минимумами и обогащены тяжелой группой РЗЭ. В водах района «Шандуй» сумма РЗЭ изменяется от 0,20 до 96,73 мкг/л при среднем значении 5,49 мкг/л, медианное значение составляет 0,81 мкг/л. На долю LREE приходится в среднем 72 %, на HREE – 28 %. Однако на величину среднего содержания РЗЭ в воде оказывают очень большое влияние две пробы воды с аномальным содержанием РЗЭ – 96,73 мкг/л, в ней же фиксируется максимальное значение тория для данного района исследований 10,01 мкг/л, в другой пробе с аномально высокими значениями сумма РЗЭ составляет 13,25 мкг/л, но в ней концентрация тория составляет 0,86 мкг/л, что находится в пределах медианного значения для района исследований. В пробе с максимальным значением суммы РЗЭ (Ш 8) – на графике самый верхний спектр, отсутствует Ce минимум и преобладает обогащение легкими РЗЭ. Исходя из того, что в этой же пробе очень высокое торий-урановое отношение – 5,8, и самое высокое содержание растворенного органического углерода, можно предположить, что высокое содержание РЗЭ связано с их присутствием в составе ассоциатов высокомолекулярных органических веществ либо с органоминеральными коллоидами (рис. 5) [20].

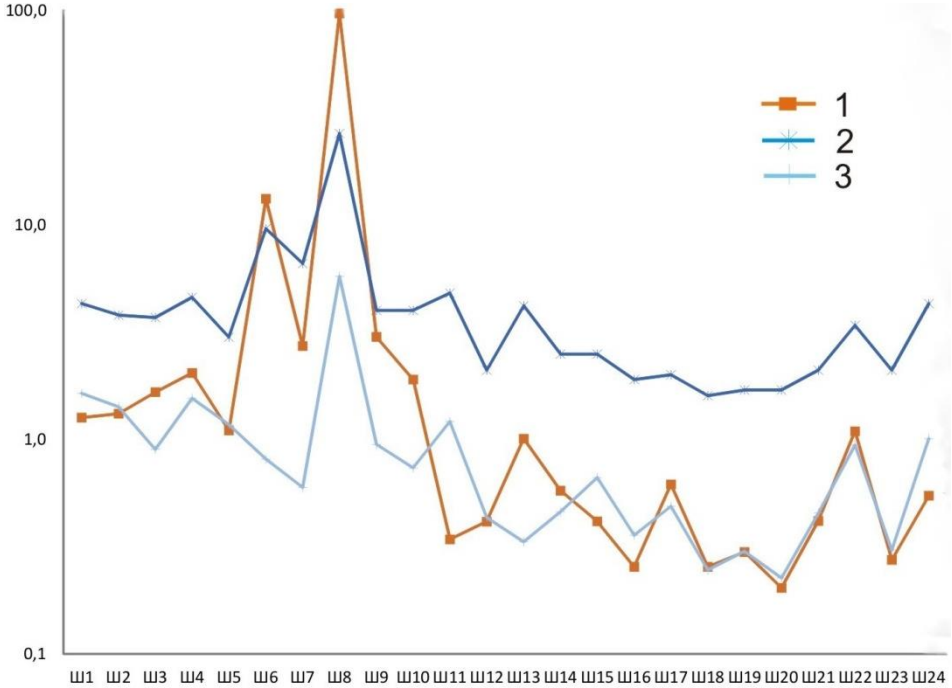



***Рис. 5.*** *Распределение растворенного органического углерода, суммы редкоземельных элементов и TH/U в природных водах района «Шандуй»: 1 – сумма РЗЭ; 2 – РОУ; 3 – Th/U*

***Fig. 5.*** *Distribution of dissolved organic carbon, the amount of REE and Th/U in the natural waters of the «Shanduy» region: 1 – REE amount; 2 – DOC; 3 – Th/U*

Растворенный органический углерод играет важную роль при фракционировании РЗЭ [20]. По положительной корреляция РОУ, Th/U и суммы РЗЭ в пробах, максимально обогащенных РЗЭ, можно предположить, что торий и РЗЭ связаны высокомолекулярными фульвокислотными соединениями [20, 21]. В то же время в ряде проб (на фоне низкого торий-уранового отношения) наблюдается высокое содержание суммы РЗЭ и РОУ. Так, в пробе с аномальным содержанием РЗЭ (Ш 6) в спектре присутствует Eu минимум и прослеживается обогащение преимущественно тяжелой группой РЗЭ, торий-урановое отношение близко к медианному значению и составляет 0,8. Для проб, обогащенных РЗЭ, так же как и в обогащенных РЗЭ пробах района «Бикин», в спектрах распределения РЗЭ характерен Eu минимум, видимо, наследуемый из вмещающих пород со взвесью. В пробах бедных РЗЭ спектры распределения РЗЭ

имеют похожий характер как для поверхностных вод Восточного макросклона Сихотэ-Алиня (рис. 3) [19].

Поверхностные воды третьего района исследований «Ванчин» являются ультрапресными с минерализацией до 134 мг/л. Воды гидрокарбонатно-натриево-кальциевые с присутствием сульфат- и хлорид-ионов. Воды обследованного района кислые и нейтральные (pH от 3,5 до 7,0). Большинство вод слабокислые с pH 5,4–6,4, что характерно для малых водотоков лесной зоны. Группа кислых источников (3 пробы), скорее всего, приурочена к зоне окисления сульфидных руд и расположена локально. Для этих вод характерно преобладание сульфат-ионов, повышенных концентраций Al, Fe, Mn, Zn, Co, Ni, Be, Ge, Rb, Y, Sc, Tl и РЗЭ [19]. Для водотоков Ванчинской впадины характерно преобладание тория в воде над ураном. В целом по массиву проанализированных проб (56 проб) среднее значение торий-уранового отношения составляет 2,1 и колеблется от 0,2 до 5,4 (табл. 1). Содержание урана в природных водах района «Ванчин» варьирует от 0,005 до 0,720 мкг/л при его среднем содержании 0,086 мкг/л. Содержание тория колеблется от 0,004 до 2,298 мкг/л при среднем значении 0,201 мкг/л.

Установлено, что содержание тория и урана в водах района «Ванчин» с различной кислотностью различается. Все пробы воды района «Ванчин» были поделены на три группы: слабокислые с pH 5,4–6,0; нейтральные с pH 6,5–7,0 и кислые с pH 3,5–3,9. Большая часть проб относится к группе со слабокислым показателем pH. В этой группе проб отчетливо прослеживается преобладание тория в воде в три и более раза, чем урана. Так, содержание урана в природных водах района «Ванчин» со слабокислым значением pH изменяется от 0,006 до 0,720 мкг/л при его среднем содержании 0,089 мкг/л. Содержание тория колеблется от 0,021 до 2,299 мкг/л, средняя концентрация составляет 0,252 мкг/л. Ториево-урановое отношение варьирует от 0,9 до 5,23, среднее значение составляет 3,0 (табл. 2). Содержание урана в нейтральных природных водах района Ванчинской впадины изменяется от 0,005 до 0,236 мкг/л при его среднем содержании 0,071 мкг/л. Содержание тория колеблется от 0,005 до 0,516 мкг/л, средняя концентрация составляет 0,123 мкг/л. Торий-урановое отношение варьирует от 0,2 до 5,0, среднее значение составляет 1,3 (табл. 2). С уменьшением pH урана в воде становится больше, чем тория (табл. 2). Таким образом, в группе кислых источников, расположенных в зоне окисления сульфидных руд, содержание урана составляет от 0,012 до 0,026 мкг/л при его среднем содержании 0,017 мкг/л. Содержание тория изменяется от 0,004 до 0,010 мкг/л, средняя концентрация составляет 0,007 мкг/л. Торий-урановое отношение варьирует от 0,2 до 0,7, среднее значение составляет 0,5. Несмотря на высокое содержание редкоземельных элементов в данной группе источников, концентрации урана и тория значительно ниже, чем в водах других групп Ванчинской впадины.

***Таблица 2.*** *Распространенность урана и тория в природных водах в зависимости от pH на примере Ванчинской впадины [17]*

***Table 2.*** *Abundance of uranium and thorium in natural waters depending on pH by the example of the Vanchin depression [17]*

| Тип вод<br>Water type | pH | Параметры<br>Parametres | Минерализация, мг/л<br>Mineralization, mg/l | Сумма РЗЭ, мкг/л<br>REE amount, μg/l | LREE | HREE | Th | U | Th/U |
|---|---|---|---|---|---|---|---|---|---|
| | | | | | % | | мкг/л/μg/l | | |
| группа слабокислых вод<br>weakly acidic water group | 5,4–6,5 | минимум<br>minimum | 6,0 | 0,31 | 0,021 | 0,006 | 0,9 | 0,0056 | 0,9262 |
| | | максимум<br>maximum | 134,6 | 31,33 | 2,299 | 0,720 | 5,3 | 0,7195 | 5,2453 |
| | | среднее<br>mean | 30,8 | 3,11 | 0,252 | 0,089 | 3,0 | 0,0894 | 3,0428 |
| | | медиана<br>median | 26,5 | 1,98 | 0,147 | 0,041 | 3,3 | 0,0407 | 3,2651 |
| | | число проб<br>number of samples | 37 | 37 | 37 | 37 | 37 | 37 | 37 |
| группа нейтральных вод<br>neutral water group | 6,5–7,0 | минимум<br>minimum | 15,4 | 0,08 | 0,005 | 0,005 | 0,2 | 0,0053 | 0,2278 |
| | | максимум<br>maximum | 71,9 | 4,11 | 0,516 | 0,236 | 5,0 | 0,2359 | 4,9780 |
| | | среднее<br>mean | 47,1 | 1,08 | 0,123 | 0,071 | 1,3 | 0,0709 | 1,3287 |
| | | медиана<br>median | 46,2 | 0,43 | 0,018 | 0,024 | 0,9 | 0,0241 | 0,8461 |
| | | число проб<br>number of samples | 15 | 15 | 15 | 15 | 15 | 15 | 15 |
| группа кислых вод<br>acidic water group | 3,5–3,9 | минимум<br>minimum | 42,8 | 5,78 | 0,004 | 0,012 | 0,2 | 0,0117 | 0,1620 |
| | | максимум<br>maximum | 67,8 | 21,57 | 0,010 | 0,026 | 0,7 | 0,0259 | 0,6688 |
| | | среднее<br>mean | 52,3 | 11,39 | 0,007 | 0,017 | 0,5 | 0,0172 | 0,4558 |
| | | медиана<br>median | 46,3 | 6,84 | 0,006 | 0,014 | 0,5 | 0,0141 | 0,5366 |
| | | число проб<br>number of samples | 3 | 3 | 3 | 3 | 3 | 3 | 3 |

Положительная зависимость между содержанием в водах тория и количеством РЗЭ, обусловленная геохимическим сродством этих элементов [22], отмечаемая в двух предыдущих районах, также характерна и для слабокислых и нейтральных вод Ванчинской впадины, коэффициент корреляции Пирсона составляет 0,7, что оценивается как высокий, согласно шкале Чеддока (рис. 3).

По опубликованным данным содержание в речных водах составляет для урана – 0,4–0,5 мкг/л [4, 11, 22], для тория – 0,1 мкг/л [23]. Торий-урановое отношение при этом близко к среднему значению для осадочных горных пород и на треть ниже среднего для земной коры. При низкой растворимости тория в водах этот факт говорит о том, что значительная доля урана и особенно тория в поверхностных водах мигрирует в составе коллоидов.

Спектры распределения РЗЭ для исследованного района «Ванчин» имеют картину распределения РЗЭ с Eu и Ce минимумами, на спектрах прослеживается некоторое обогащение средней группой РЗЭ (рис. 3). Аномально высокие содержания РЗЭ отмечены среди гидрокарбонатных вод в пробе «В-72», среди сульфатных кислых вод в пробе «В-59» (Малый ручей с болота (сульфидная зона)). В пробе «В-59» при сумме РЗЭ 21,57 мкг/л Th/U равно 0,2. В пробе «В-72» сумма РЗЭ составляет 31,33 мкг/л и содержание тория имеет свое максимальное значение для района исследований «Ванчин» 2,298 мкг/л, и как следствие Th/U тоже имеет высокое значение и равно 3,2.

На спектрах распределения РЗЭ по всем исследованным районам (рис. 8) мы видим, что спектры имеют по усредненным величинам похожую картину распределения с выраженными Eu и Ce минимумами и имеют спектр, характерный в целом для Восточного макросклона Сихотэ-Алиня [19]. В то же время для спектров распределения РЗЭ характерен более выраженный Eu минимум, что наследуется из пород. На диаграмме приведен спектр распределения РЗЭ в туфах района «Ванчин».

Отношения валовых содержаний урана к торию (Th/U) являются важным показателем как в прикладном, так и в теоретическом аспекте. Этот показатель, по результатам исследований ряда авторов [24–29], является чрезвычайно важным индикатором. Th/U отношение, начиная от Солнечной системы в целом (Th/U=3,72) до ее планет и Луны (Th/U=3,55), метеоритов (Th/U=2,5–8,6), магматических образований различного типа, находится в чрезвычайно узком интервале величин (2,5–5 при преобладании 3,5–4,5) [25, 29], что заставляет предполагать существование общей закономерности в распространении тория и урана. Эта система отношений выдерживается во многих горных породах за исключением химических и биогенных образований, продуктов метаморфизма и метасоматизма, т. е. достаточно динамичных природных систем с участием воды [25].

Из рис. 6 видно, что воды исследованного района «Шандуй» лежат в диапазоне торий-уранового отношения от Th/U=0,5 до Th/U=2. Для природных вод «Бикина» показана широкая вариабельность торий-уранового отношения. Большая часть исследованных проб природных вод в районе «Бикин» имеет значение Th/U<1. Что касается исследованных проб природных вод района «Ванчин», то на рисунке они лежат в диапазоне 1>Th/U<5, в отдельных пробах имея значение Th/U>5.

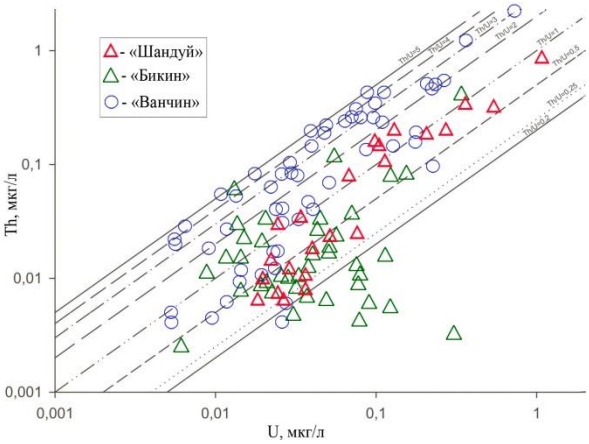



***Рис. 6.*** *Радиогеохимическая характеристика природных вод изученных районов*

***Fig. 6.*** *Radiogeochemical characteristics of natural waters of the studied areas*

Распределение соотношения радиоактивных и суммы редкоземельных элементов (рис. 7) показало их однородное расположение в системе «Th-U-ΣРЗЭ». Из общей картины выделяется ряд проб района «Бикин», обедненных РЗЭ и торием.

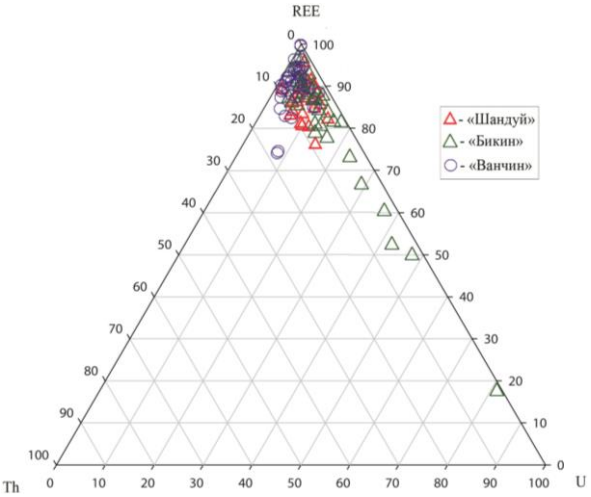



***Рис. 7.*** *Тройная диаграмма соотношения содержаний Th, U исуммы РЗЭ в природных водах исследованных районов*

***Fig. 7.*** *Ternary diagram of Th, U contents, sum of REE in the natural waters of the surveyed areas*

В изученных районах максимально обогащены РЗЭ отдельные пробы как кислых, так и нейтральных источниковых вод. Для немногочисленных кислых проб характерно низкое торий-урановое соотношение и отрицательная корреляция тория и РЗЭ. Для аномальных по содержанию суммы РЗЭ отдельных

нейтральных вод, отобранных в непосредственной близости от солонцов – кудуров, характерно высокое торий урановое отношение и отчетливый европиевый минимум на спектре распределения РЗЭ.

### Заключение

Были изучены содержания радиоактивных (Th, U) и редкоземельных элементов (La, Ce, Pr, Nd, Pm, Sm, Eu, Gd, Tb, Dy, Ho, Er, Tm, Yb, Lu) в природных водах, приуроченных к районам развития кудуров, расположенных в Центральном Сихотэ-Алине Приморского края.

Проведенный анализ распространенности урана и тория и РЗЭ в природных водах центрального Сихотэ-Алиня показал широкую вариабельность в их распределении. Высокий коэффициент корреляции малорастворимого тория и РЗЭ в обогащенных ими пресных водах, вероятно, свидетельствует о миграции последних преимущественно в составе коллоидов в таких источниках, к которым часто приурочены природные солонцы – кудуры, где и отмечаются проявления процессов литофагии, детально описанных нами ранее. Это определяется, видимо, как миграционными особенностями элементов в условиях гипергенеза, так и процессами перераспределения тория и урана в воде и донных отложениях таких источников, претерпевающих периодическое «взмучивание» тонких минеральных фракций в процессе литофагиальной активности диких животных. Для спектров распределения РЗЭ характерен более выраженный Eu минимум, чем характерный в целом для Восточного макросклона Сихотэ-Алиня, который, вероятно, наследуется из дренируемых цеолитизированных и оглиненных кислых пород. Отмеченная положительная корреляция растворенного органического углерода, Th/U и суммы РЗЭ и связываемая нами с наличием коллоидов в изученных пробах требует дальнейшего изучения.

*Работа выполнена при финансовой поддержке грантов РНФ: № 20-67-47005, 20-64-47021.*

### СПИСОК ЛИТЕРАТУРЫ

1. Шварцев С.Л. Гидрогеохимия зоны гипергенеза. – М.: Недра, 1998. – 380 с.
2. Арбузов С.И., Рихванов Л.П. Геохимия радиоактивных элементов. – Томск: Изд-во Томского политехнического университета, 2020. – 341 с.
3. Regional geochemical survey of concealed sandstone-type uranium deposits using fine-grained soil and groundwater in the Erlian basin, north-east China / B. Zhang, X. Wang, J. Zhou, Z. Han, Q. Liu, W. Wang, R. Li, B. Zhang, B. Dou // Journal of Geochemical Exploration. – 2020. – V. 216. – 106573. URL: https://doi.org/10.1016/j.gexplo.2020.106573 (дата обращения 01.11.2021).
4. Уран и торий в природных водах юго-востока Алтае-Саянской области / Ю.Г. Копылова, Н.В. Гусева, К.Д. Аракчаа, А.А. Хващевская, И.С. Мазурова, О.Д. Аюнова, Ч.К Ойдуп., К.М. Рычкова // Радиоактивность и радиоактивные элементы в среде обитания человека: Материалы V Международной конференции. – Томск, 2016. – С. 339–345.
5. Распределение урана и тория в природных и техногенных водах (например объектов Западной и Восточной Сибири) / И.Н. Мягкая, Б.Ю. Сарыг-оол, И.С. Кириченко, В.И. Малов, М.А. Густайтис, Е.В. Лазарева // Радиоактивность и радиоактивные элементы в среде обитания человека. – Томск: Изд-во Томского политехнического университета, 2021. – С. 385–389.
6. Protano G., Riccobono F. High contents of rare earth elements (REEs) in stream waters of a Cu–Pb–Zn mining area // Environmental Pollution. – 2002. – V. 117. – P. 499–514.
7. Geophagy in animals and geology of kudurs (mineral licks): a review of Russian publications / A.M. Panichev, K.S. Golokhvast, A.N. Gulkov, I.Yu. Chekryzhov // Environmental Geochemistry and Health. – 2013. – V. 35. – № 1. – P. 133–152.
8. Rare earth elements upon assessment of reasons of the geophagy in Sikhote-Alin region (Russian Federation), Africa and other world regions / A.M. Panichev, V.K. Popov, I.Yu. Chekryzhov, I.V. Seryodkin, T.A. Stolyarova, S.V. Zakusin, A.A. Sergievich, P.P. Khoroshikh // Environmental Geochemistry and Health. – 2016. – V. 38. – № 6. – P. 1255–1270.
9. Results of geological and geochemical investigations of Kaplanov kudurs in Sikhote-Alin, Russian Far East / A.M. Panichev, I.V. Seryodkin, O.Yu. Zaumyslova, E.A. Wach, T.A. Stolyarova, A.A. Sergievich, V.K. Popov, I.Yu. Chekryzhov, M.G. Blokhin, P.P. Khoroshikh // Arabian Journal of Geosciences. – 2018. – V. 11 (17): 493. DOI: 10.1007/s12517-018-3820-z
10. Ветренников В.В. Геологическое строение Сихотэ-Алинского заповедника и Центрального Сихотэ-Алиня // Тр. Сихотэ-Алинского заповедника. – 1976. – Вып. 6. – 167 с.
11. Середин В.В., Чекрыжов И.Ю. Рудоносность Ванчинского грабена // Геология рудных месторождений. – 2011. – Т. 53. – № 3. – С. 230–249.
12. Новые данные по стратиграфии, вулканизму и цеолитовой минерализации Ванчинской впадины, Приморский край / И.Ю. Чекрыжов, В.К. Попов, А.М. Паничев, В.В. Середин, Е.В. Смирнова // Тихоокеанская геология. – 2010. – Т. 29. – № 4. – С. 45–63.
13. The European shale: an improved data set for normalisation of rare earth element and yttrium concentrations in environmental and biological samples from Europe / M. Bau, K. Schmidt, A. Pack, V. Bendel, D. Kraemer // Applied Geochemistry. – 2018. – V. 90. – P. 142–149.
14. Migaszewskia Z.M., Gałuszkaa A. The characteristics, occurrence, and geochemical behavior of rare earth elements in the environment: a review // Critical Reviews in Environmental Science and Technology. – 2015. – V. 45. – Iss. 5. – P. 429–471.
15. The North American shale composite: its compilation, major and trace element characteristics / L.P. Gromet, R.F. Dymek, L.A. Haskin, R.L. Korotev // Geochimica et Cosmochimica Acta. – 1984. – V. 48. – Iss. 12. – P. 2469–2482.
16. Landscape REE anomalies and the cause of geophagy in wild animals at kudurs (mineral salt licks) in the Sikhote-Alin (Primorsky Krai, Russia) / A.M. Panichev, N.V. Baranovskaya, I.V. Seryodkin, I.Yu. Chekryzhov, E.A. Vakh, B.R. Soktoev, A.I. Belyanovskaya, R.A. Makarevich, T.N. Lutsenko, N.Yu. Popov, A.V. Ruslan, D.S. Ostapenko, A.V. Vetoshkina, V.V. Aramilev, A.S. Kholodov, K.S. Golokhvast // Environmental Geochemistry and Health. – 2021. URL: https://doi.org/10.1007/s10653-021-01014-w (дата обращения 01.11.2021).
17. Уран и торий в природных водах центрального Сихотэ-Алиня (Приморский край) / А.В. Ветошкина, И.Ю. Чекрыжов, А.М. Паничев, Е.А. Вах // Радиоактивность и радиоактивные элементы в среде обитания человека. – Томск: Изд-во Томского политехнического университета, 2021. – С. 109–114.
18. Gaillardet J., Viers J., Dupre B. Trace elements in river waters // Treatise on Geochemistry. – 2003. – V. 5. – P. 225–272.
19. Вах Е.А. Геохимия редкоземельных элементов в природных и техногенных водах юга Дальнего Востока России. – Владивосток: Дальневосточный федеральный университет, 2014. – 168 с.
20. Торопов А.С., Солдатова Е.А., Рихванов Л.П. Формы миграции радионуклидов (U и Th) в природных водах в различных геохимических условиях на основе расчетных и экспериментальных данных // Известия ТПУ. Инжиниринг георесурсов. – 2020. – Т. 331. – № 12. – С. 7–21.
21. Геохимические особенности поведения редкоземельных элементов в водах Дальнего Востока России в условиях природ-

ных и антропогенных аномалий / О.В. Чудаев, Н.А. Харитонова, Г.А. Челноков, И.В. Брагин, Е.Г. Калитина. – Владивосток: Дальнаука, 2017. – 152 с.
22. Иванов В.В. Экологическая геохимия элементов. Кн. 6. Редкие f-элементы. – М.: Экология, 1997. – 607 с.
23. Корж В.Д. Геохимия элементного состава гидросферы. – М.: Наука, 1991. – 243 с.
24. Рихванов Л.П. Радиогеохимическая типизация рудно-магматических образований. – Новосибирск: Гео, 2003. – 536 с.
25. Рихванов Л.П. Радиоактивные элементы в геосферных оболочках // Радиоактивность и радиоактивные элементы в среде обитания человека. – Томск: Тандем-Арт, 2004. – С. 498–505.
26. Смыслов А.А. Уран и торий в земной коре. – Л: Недра, 1974. – 231 с.
27. Allegre C.V., Dupre B., Lewin E. Torium/uranium ratio of the Earth // Chemical Geology. – 1986. – V. 56. – № 3–4. – P. 219–227.
28. Барановская Н.В. Тенденции накопления некоторых актинидов в живом веществе // Радиоактивность и радиоактивные элементы в среде обитания человека. – Томск: STT, 2016. – С. 93–98.
29. Редкоземельные и радиоактивные (Th, U) элементы в компонентах природной среды на территории Томской области / Н.В. Барановская, Е.Н. Агеева, Б.Р. Соктоев, Д.В. Наркович, О.А. Денисова, Т.В. Матковская // Известия Томского политехнического университета. Инжиниринг георесурсов. – 2020. – Т. 331. – № 2. – С. 17–28.

*Поступила 08.12.2021 г.*

**Информация об авторах**

***Ветошкина А.В.***, младший научный сотрудник лаборатории геохимии, Дальневосточный геологический институт ДВО РАН.

***Чекрыжов И.Ю.***, научный сотрудник лаборатории геохимии, Дальневосточный геологический институт ДВО РАН.

***Паничев А.М.***, доктор биологических наук, ведущий научный сотрудник лаборатории экологии и охраны животных, Тихоокеанский институт географии ДВО РАН.

***Вах Е.А.***, кандидат геолого-минералогических наук, научный сотрудник лаборатории гидрохими, Тихоокеанский институт океанологии им. Ильичева ДВО РАН.

***Барановская Н.В.***, доктор биологических наук, профессор отделения геологии Инженерной школы природных ресурсов, Национальный исследовательский Томский политехнический университет.

***Луценко Т.Н.***, кандидат географических наук, научный сотрудник лаборатории геохимии, Тихоокеанский институт географии ДВО РАН.

UDC 550.4:550.43

# RADIOACTIVE (TH, U) AND RARE EARTH ELEMENTS IN NATURAL WATERS OF CENTRAL SIKHOTE-ALIN (PRIMORSKY KRAI)

**Alena V. Vetoshkina**[1],
vetoshkina.alena@mail.ru

**Igor Yu. Chekryzhov**[1],
chekr2004@mail.ru

**Alexander M. Panichev**[2],
sikhote@mail.ru

**Elena A. Vakh**[3],
adasea@mail.ru

**Natalia V. Baranovskaya**[4],
nata@tpu.ru

**Tatyana N. Lutsenko**[2],
lutsenko53@bk.ru

[1] Far East Geological Institute FEBRAS,
159, 100 let Vladivostoku avenue, Vladivostok, 690022, Russia.

[2] Pacific Institute of Geography FEBRAS,
7, Radio street, Vladivostok, 690041, Russia.

[3] V.I. Ilichev Pacific Oceanological Institute FEBRAS,
43, Baltiyskaya street, Vladivostok, 690041, Russia.

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

***Relevance.*** *The complex picture of Th and U balance, their relationship with rare earth elements in natural waters of various compositions and the importance of these elements as indicators for hydrogeochemical constructions and conclusions determines the relevance of their study in different regions using modern analytical methods.*
***Objects:*** *content and balance of uranium and thorium in natural waters of three regions of the central Sikhote-Alin in the Primorsky Krai: «Shanduy», «Vanchin», «Bikin».*
***Methods.*** *55 elements were detected by inductively coupled plasma mass spectrometry (ICP-MS) (spectrometer Agilent 7700x, Agilent Techn., USA). The second tube was used to determine five macrocations by atomic emission spectrometry (iCAP 7600 Duo spectrometer), as well as six anions by ion chromatography (ion liquid chromatograph LC-20, Shimadzu, Japan).*
***Results.*** *New data are presented on the content of radioactive elements (thorium and uranium), the value of Th/U, the content of rare earth elements in natural waters confined to the location of the kudurs (specific places of manifestation of lithophagy) in three regions geographically located in the central Sikhote-Alin of the Primorsky Krai: «Shanduy», «Vanchin», «Bikin». The average contents of radioactive (Th, U) and rare earth (La, Ce, Pr, Nd, Pm, Sm, Eu, Gd, Tb, Dy, Ho, Er, Tm, Yb, Lu) elements in natural waters were established. The studied natural waters are ultrafresh and fresh with an average mineralization of 52,4 mg/l. U content in waters ranges from 0,005 to 1,067 μg/l. Th concentration in water varies from 0,003 to 2,299 μg/l. The thorium–uranium ratio in waters varies from 0,01 to 5,3. A positive relationship was found between the content of thorium in the waters and the amount of rare earth elements.*

***Key words:***
*Rare earth and radioactive elements, natural waters, salt licks, kudurs, indicator values, ratios of elements, Primorsky Krai, Sikhote-Alin.*

*The research was financially supported by the RSF grants: no. 20-67-47005, 20-64-47021.*

## REFERENCES

1. Shvartsev S.L. *Gidrogeokhimiya zony gipergeneza* [Hydrogeochemistry of the hypergenesis zone]. Moscow, Nedra Publ., 1998. 380 p.
2. Arbuzov S.I., Rikhvanov L.P. *Geokhimiya radioaktivnykh elementov* [Geochemistry of radioactive elements]. Tomsk, Tomsk Polytechnic University Publ., 2020. 341 p.
3. Zhang B., Wang X., Zhou J., Han Z., Liu Q., Wang W., Li R., Zhang B., Dou B. Regional geochemical survey of concealed sandstone-type uranium deposits using fine-grained soil and groundwater in the Erlian basin, north-east China. *Journal of Geochemical Exploration*, 2020, vol. 216, 106573. Available at: https://doi.org/10.1016/j.gexplo.2020.106573 (accessed 1 November 2021).
4. Kopylova Yu.G., Guseva N.V., Arakchaa K.D., Khvashchevskaya A.A., Mazurova I.S., Ayunova O.D., Oydup Ch.K., Rychkova K.M. Uran i toriy v prirodnykh vodakh yugo-vostoka Altae-Sayanskoy oblasti [Uranium and thorium in natural waters of the southeast of the Altai-Sayan region]. *Materialy V Mezhdunarodnoy konferentsii. Radioaktivnost i radioaktivnye elementy v srede obitaniya cheloveka* [Materials of the V International Conference. Radioactivity and Radioactive Elements in the Human Environment]. Tomsk, 2016. pp. 339–345.

5. Myagkaya I.N., Saryg-ool B.Yu., Kirichenko I.S., Malov V.I., Gustaitis M.A., Lazareva E.V. Raspredelenie urana i toriya v prirodnykh i tekhnogennykh vodakh (naprimere obektov Zapadnoy i Vostochnoy Sibiri) [Distribution of uranium and thorium in natural and technogenic waters (for example objects of Western and Eastern Siberia)]. *Radioaktivnost i radioaktivnye elementy v srede obitaniya cheloveka* [Radioactivity and radioactive elements in environment]. Tomsk, Tomsk Polytechnic University Publ., 2021. pp. 385–389.
6. Protano G., Riccobono F. High contents of rare earth elements (REEs) in stream waters of a Cu–Pb–Zn mining area. *Environmental Pollution*, 2002, vol. 117, pp. 499–514.
7. Panichev A.M., Golokhvast K.S., Gulkov A.N., Chekryzhov I.Yu. Geophagy in animals and geology of kudurs (mineral licks): a review of Russian publications. *Environmental Geochemistry and Health*, 2013, vol. 35, no. 1, pp. 133–152.
8. Panichev A.M., Popov V.K., Chekryzhov I.Yu., Seredkin I.V., Stolyarova T.A., Zakusin S.V., Sergievich A.A., Khoroshikh P.P. Rare earth elements upon assessment of reasons of the geophagy in Sikhote-Alin region (Russian Federation), Africa and other world regions. *Environmental Geochemistry and Health*, 2016, vol. 38, no. 6, pp. 1255–1270.
9. Panichev A.M., Seryodkin I.V., Zaumyslova O.Yu., Wach E.A., Stolyarova T.A., Sergievich A.A., Popov V.K., Chekryzhov I.Yu., Blokhin M.G., Khoroshikh P.P. Results of geological and geochemical investigations of Kaplanov kudurs in Sikhote-Alin, Russian Far East. *Arabian Journal of Geosciences*, 2018, vol. 11 (17): 493. DOI: 10.1007/s12517-018-3820-z
10. Vetrennikov V.V. Geologicheskoe stroenie Sikhote-Alinskogo gosudarstvennogo zapovednika i tsentralnogo Sikhote-Alinya [Geological structure of the Sikhote-Alin nature reserve and Central Sikhote-Alin]. *Trudy Sikhote-Alinskogo zapovednika*, 1976, no. 6, pp. 167.
11. Seredin V.V., Chekryzhov I.Yu. Ore content of the Vanchinsky graben. *Geology of Ore deposits*, 2011, vol. 53, no. 3, pp. 230–249. In Rus.
12. Chekryzhov I.Yu., Popov V.K., Panichev A.M., Seredin V.V., Smirnova E.V. New data on stratigraphy, volcanism and zeolite mineralization of the Vanchinsky depression, Primorsky Territory. *Russian Journal of Pacific Geology*, 2010, vol. 29, no. 4, pp. 45–63. In Rus.
13. Bau M., Schmidt K., Pack A., Bendel V., Kraemer D. The European shale: an improved data set for normalisation of rare earth element and yttrium concentrations in environmental and biological samples from Europe. *Applied Geochemistry*, 2018, vol. 90, pp. 142–149.
14. Migaszewskia Z.M., Gałuszkaa A. The characteristics, occurrence, and geochemical behavior of rare earth elements in the environment: a review. *Critical Reviews in Environmental Science and Technology*, 2015, vol. 45, Iss. 5, pp. 429–471.
15. Gromet L.P., Dymek R.F., Haskin L.A., Korotev R.L. The «North American shale composite»: its compilation, major and trace element characteristics. *Geochimica et Cosmochimica Acta*, 1984, vol. 48, pp. 2469–2482.
16. Panichev A.M., Baranovskaya N.V., Seryodkin I.V., Chekryzhov I.Yu., Vakh E.A., Soktoev B.R., Belyanovskaya A.I., Makarevich R.A., Lutsenko T.N., Popov N.Yu., Ruslan A.V., Ostapenko D.S., Vetoshkina A.V., Aramilev V.V., Kholodov A.S., Golokhvast K.S. Landscape REE anomalies and the cause of geophagy in wild animals at kudurs (mineral salt licks) in the Sikhote-Alin (Primorsky Krai, Russia). *Environmental Geochemistry and Health*, 2021. Available at: https://doi.org/10.1007/s10653-021-01014-w (accessed 1 November 2021).
17. Vetoshkina A.V., Chekryzhov I.Yu., Panichev A.M., Vakh E.A. Uran i toriy v prirodnykh vodakh tsentralnogo Sikhote-Alinya (Primorskiy kray) [Uranium and thorium in natural waters of the central Sikhote-Alin (Primorsky Territory)]. *Radioaktivnost i radioaktivnye elementy v srede obitaniya cheloveka* [Radioactivity and radioactive elements in environment]. Tomsk, Tomsk Polytechnic University Publ., 2021. pp. 109–114.
18. Gaillardet J., Viers J., Dupre B. Trace elements in river waters. *Treatise on geochemistry*, 2003, vol. 5, pp. 225–272.
19. Vakh E.A. *Geokhimiya redkozemelnykh elementov v prirodnykh i tekhnogennykh vodakh yuga Dalnego Vostoka Rossii* [Geochemistry of rare earth elements in natural and technogenic waters in the south of the Russian Far East.]. Vladivostok, FEFU Publ., 2014. 168 p.
20. Toropov A.S., Soldatova E.A., Rikhvanov L.P. Forms of migration of radionuclides (U and Th) in natural waters under various geochemical conditions based on calculated and experimental data. *Bulletin of the Tomsk Polytechnic University. Geo Assets Engineering*, 2020, vol. 331, no. 12, pp. 7–21. In Rus.
21. Chudaev O.V., Kharitonova N.A., Chelnokov G.A., Bragin I.V., Kalitina E.G. *Geokhimicheskie osobennosti povedeniya redkozemelnykh elementov v vodakh Dalnego Vostoka Rossii v usloviyakh prirodnykh i antropogennykh anomaliy* [Geochemical features of the behavior of rare earth elements in the waters of the Russian Far East under natural and anthropogenic anomalies]. Vladivostok, Dalnauka Publ., 2017. 152 p.
22. Ivanov V.V. *Ekologicheskaya geokhimiya elementov*. Kn. 6. Redkie f-elementy [Ecological geochemistry of elements. B. 6. Rare f-elements]. Moscow, Ekologiya Publ., 1997. 607 p.
23. Korzh V.D. *Geokhimiya elementnogo sostava gidrosfery* [Geochemistry of the elemental composition of the hydrosphere]. Moscow, Nauka Publ., 1991. 243 p.
24. Rikhvanov L.P. *Radiogeokhimicheskaya tipizatsiya rudnomagmaticheskikh obrazovaniy* [Radiogeochemical typification of ore-magmatic formation]. Novosibirsk, Geo Publ., 2003. 536 p.
25. Rikhvanov L.P. Radioaktivnye elementy v geosfernykh obolochkakh [Radioactive elements in geospheric envelopes]. *Radioaktivnost i radioaktivnye elementy v srede obitaniya cheloveka* [Radioactivity and radioactive elements in environment]. Tomsk, Tandem-Art Publ., 2004. pp. 498–505.
26. Smyslov A.A. *Uran i toriy v zemnoy kore* [Uranium and thorium in the earth's crust]. Lenigrad, Nedra Publ., 1974. 231 p.
27. Allegre C.V., Dupre B., Lewin E. Torium/uranium ratio of the Earth. *Chemical Geology*, 1986, vol. 56, no. 3–4, pp. 219–227.
28. Baranovskaya N.V. Tendentsii nakopleniya nekotorykh aktinidov v zhivom veshchestve [Accumulation trends of some actinides in living matter]. *Radioaktivnost i radioaktivnye elementy v srede obitaniya cheloveka* [Radioactivity and radioactive elements in environment]. Tomsk, STT Publ., 2016. pp. 93–98.
29. Baranovskaya N.V., Ageeva E.V., Soktoev B.R., Narkovich D.V., Denisova O.A., Matkovskaya T.V. Rare earth and radioactive (Th, U) elements in the components of the natural environment in the Tomsk region. *Bulletin of the Tomsk Polytechnic University. Geo Assets Engineering*, 2020, vol. 331, no. 2, pp. 17–28. In Rus.


*Received: 8 December 2021.*

**Information about the authors**


***Alena V. Vetoshkina***, junior researcher, Far East Geological Institute FEBRAS.

***Igor Yu. Chekryzhov***, researcher, Far East Geological Institute FEBRAS.

***Alexander M. Panichev***, Dr. Sc., leading researcher, Pacific Institute of Geography FEBRAS.

***Elena A. Vakh***, Cand. Sc., researcher, V.I. Ilichev Pacific Oceanological Institute FEBRAS.

***Natalia V. Baranovskaya***, Dr. Sc., professor, National Research Tomsk Polytechnic University.

***Tatyana N. Lutsenko***, Cand. Sc., researcher, Pacific Institute of Geography FEBRAS.

УДК 551.464.3 (1-924.71)

# ПЕРВЫЕ РЕЗУЛЬТАТЫ КОМПЛЕКСНЫХ ИЗОТОПНО-ГИДРОГЕОХИМИЧЕСКИХ ИССЛЕДОВАНИЙ НОВОБИБЕЕВСКОГО ПРОЯВЛЕНИЯ РАДОНОВЫХ ВОД

**Новиков Дмитрий Анатольевич**[1,2],
NovikovDA@ipgg.sbras.ru

**Дульцев Федор Федорович**[1],
DultsevFF@ipgg.sbras.ru

**Максимова Анастасия Алексеевна**[1,2],
rock.nastaya64@gmail.com

**Пыряев Александр Николаевич**[3,2],
pyrayev@igm.nsc.ru

**Фаге Алексей Николаевич**[1],
FaguetAN@ipgg.sbras.ru

**Хващевская Альбина Анатольевна**[4],
unpc_voda@mail.ru

**Деркачев Антон Сергеевич**[2],
a.derkachev@g.nsu.ru

**Черных Анатолий Витальевич**[1],
ChernykhAV@ipgg.sbras.ru

[1] Институт нефтегазовой геологии и геофизики им. А.А. Трофимука СО РАН,
Россия, 630090, г. Новосибирск, пр. Академика Коптюга, 3.

[2] Новосибирский национальный исследовательский государственный университет,
Россия, 630090, г. Новосибирск, ул. Пирогова, 1.

[3] Институт геологии и минералогии им. В.С. Соболева СО РАН,
Россия, 630090, г. Новосибирск, пр. Академика Коптюга, 3.

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

***Актуальность*** *исследования заключается в получении первых изотопно-геохимических данных о природных водах и вмещающих горных породах Новобибеевского проявления радоновых вод.*

***Цель:*** *изучить особенности химического состава природных вод и водовмещающих пород и получить первые сведения по активности $^{222}Rn$ и изотопному составу δD, $\delta^{18}O$, $\delta^{13}C$.*

***Методы.*** *Лабораторное изучение химического состава методами титриметрии, ионной хроматографии, масс-спектрометрии с индуктивно связанной плазмой проводилось в ПНИЛ гидрогеохимии ИШПР ТПУ. Определение комплекса величин δD, $\delta^{18}O$, $\delta^{13}C_{DIC}$ вод и растворенного неорганического углерода (Dissolved Inorganic Carbon (DIC)) проводилось в центре коллективного пользования ИГМ СО РАН с помощью прибора Isotope Ratio Mass Spectrometer Finnigan™ MAT 253, снабженного приставками пробоподготовки H/Device (для определений δD) и GasBench II (для определений $\delta^{18}O$ и $\delta^{13}C_{DIC}$). Измерение содержаний $^{222}Rn$ в водах проводилось на комплексе «Альфарад плюс» в лаборатории гидрогеологии осадочных бассейнов Сибири ИНГГ СО РАН. Геофизические исследования проводились с применением электроразведочной аппаратуры Скала-48 с 48 электродами и шагом между ними 5 м, по электроразведочной схеме Шлюмберже. Разделение данных на однородные геохимические совокупности выполнено с помощью коэффициентов Ca/Na, Ca/Mg, Ca/Si, Mg/Si, Na/Si. Для выявления степени концентрирования химических элементов в природных водах были рассчитаны коэффициенты концентрации $Kk_i = \frac{m_x}{n_x}$ и водной миграции (по А.И. Перельману) $Kx_1 = \frac{m_x \cdot 100}{a \cdot n_x}$.*

***Результаты.*** *Выполнены комплексные изотопно-геохимические исследования радоновых вод Новобибеевского проявления. Радоновые воды (активность $^{222}Rn$ до 429 Бк/дм$^3$) в основном характеризуются $HCO_3$ Mg-Ca составом с величиной общей минерализации от 385 до 818 мг/дм$^3$ и содержанием кремния от 5,77 до 13,30 мг/дм$^3$. Геохимические параметры среды варьируют от восстановительной до окислительной обстановки с величинами Eh от –81,2 до +212,7 мВ; pH от 6,6 до 7,5 и $O_{2раств.}$ от 1,62 до 7,89 мг/дм$^3$. Подземные воды были разделены на две геохимические совокупности: 1) трещинно-жильные воды гранитоидов с отношениями Ca/Si 11,49; Mg/Si 2,48; Na/Si 1,25; Si/Na 0,87; Ca/Na 10,02; Ca/Mg 4,76; rNa/rCl 8,79 и SO4/Cl 4,35 и 2) воды зоны региональной трещиноватости гранитоидов в условиях антропогенного влияния с отношениями Ca/Si 16,43; Mg/Si 2,21; Na/Si 2,21; Si/Na 0,62; Ca/Na 9,84; Ca/Mg 9,95; rNa/rCl 0,89 и $SO_4$/Cl 1,78. Поверхностные воды в условиях техногенной нарушенности по составу $SO_4$-$HCO_3$ Na-Mg-Ca с величиной общей минерализации от 385 до 461 мг/дм$^3$ и содержанием кремния от 5,02 до 9,60 мг/дм$^3$. Геохимические параметры среды отвечают окислительной обстановке с величинами Eh от +107,8 до +145,6 мВ; pH от 7,8 до 8,6 и $O_{2раств.}$ от 6,49 до 14,38 мг/дм$^3$. Активность радона в водах не превышает 39 Бк/дм$^3$. Поверхностные воды реки Ояш характеризуются в основном $HCO_3$ Na-Mg-Ca составом с величиной общей минерализации от 407 до 466 мг/дм$^3$ и содержанием кремния от 1,22 до 2,87 мг/дм$^3$. Геохимические параметры среды отвечают окислительной обстановке с величинами Eh от +120,1 до +150,0 мВ; pH от 8,4 до 8,5 и $O_{2раств.}$ от 7,45 до 9,53 мг/дм$^3$. Активность радона в речных водах варьирует от 1 до 12 Бк/дм$^3$. С ростом общей минерализации в радоновых водах концентрируются Li, Cr, Zn, Br, Sr и U. На спектре их распределения наиболее высокие содержания (мг/дм$^3$) закономерно установлены у: Si до 8,85, Mn до 0,22, Fe до 0,34, Sr до 0,77 и Ba до 0,13, поскольку водовмещающие породы представлены биотитовыми гранитами, порфировидными и оливиновыми долеритами. В водах в большей мере накапливаются Br, I, Se, Te, Re и U, а наибольшей миграционной способностью в этих условиях отличаются I, Se, Br, Te, Re, U, B, Sr и Mo. Изотопный состав (δD от –139,4 до –112,5 ‰ и $\delta^{18}O$ от –18,9 до –14,4 ‰) и расположение точек на диаграмме δD=f($\delta^{18}O$) указывает на метеорное происхождение всех изученных вод. Полученные значения $\delta^{13}C_{DIC}$ варьируют в диапазоне от –14,2 до –10,0 ‰ при содержании DIC от 3,4 до 8,7 ммоль/дм$^3$. Основным источником водорастворенной углекислоты является почвенная углекислота смешанного состава.*

***Ключевые слова:***
*Радоновые воды, стабильные изотопы, радон, генезис вод, граниты,*
*новое проявление радоновых вод «Новобибеевское», Новосибирская область, Западная Сибирь.*

### Введение

В настоящее время в научных и производственных кругах наблюдается устойчивый интерес к изучению минеральных вод различного изотопно-геохимического облика и бальнеологической ценности. Эта общемировая тенденция связана с быстро растущим рынком бутилированных вод и спросом населения на бальнеолечение (бурное развитие SPA-индустрии). Радоновые воды не являются исключением. Научная проблема о природе радиоактивности подземных вод стоит среди наиболее актуальных в гидрогеохимии, начиная с работ В.И. Вернадского [1]. Наибольшее число опубликованных в мире работ посвящено изучению геологических, гидрогеологических и геохимических факторов, влияющих на распределение природных радионуклидов в водах [2–9 и другие]. Ряд исследований посвящено радиоактивному загрязнению вод и грунтов месторождений полезных ископаемых [10–12]. В некоторых публикациях рассматривается пагубное воздействие $^{227}$Ac, $^{40}$K, $^{210}$Pb, $^{210}$Po, $^{226}$Ra, $^{228}$Ra, $^{228}$Th, $^{230}$Th, $^{232}$Th, $^{234}$U, $^{238}$U и тяжелых металлов на окружающую биоту [13, 14]. Например, в исследованиях [15, 16] приводятся факты по основной роли горнодобывающей промышленности в загрязнении почв As, W, Hg, Sr, Th и U. Среди последних комплексных работ по изучению распределения радионуклидов в водах питьевого назначения и их влиянию на здоровье человека можно привести [17, 18].

Радоновые воды пользуются широким распространением в Новосибирской области (НСО). Как правило, они связаны с крупными гранитоидными массивами Новосибирским, Приобским, Барлакским и другими. Большинство из проявлений и месторождений радоновых вод было открыто в 1970–80-х гг., но при этом они отличаются крайне низкой степенью гидрогеологической изученности [19–22]. Последние сведения по радоновым водам Новосибирской области приводятся в работах [23–29]. В полевой сезон 2019 г., связанный с изучением качества подземных вод нецентрализованного водоснабжения населения НСО, была опробована серия скважин в селе Новобибеево, расположенном в западной части Болотнинского района (рис. 1, *а*). В результате лабораторных исследований в ряде проб была установлена высокая активность $^{222}$Rn (до 429 Бк/дм$^3$). Скважины повторно опробовались в 2020–2021 гг., что позволило подтвердить полученные ранее результаты. Проявление установлено в пределах Приобского монцодиорит-граносиенит-гранитового мезоабиссального комплекса.

Схожей активностью радона до 500 Бк/дм$^3$ обладают природные воды португальских регионов Трас-ос-Монтес и Альто-Дору [30]; горячих источников районов Тата Пани, Гилгит (Пакистан) [31]; медного пояса Кхетри в Раджастане (Индия) [32]; Польши [33]; Румынии [34] и других регионов мира. Поэтому целью настоящей работы является получение актуальных данных по изотопно-геохимическим особенностям радоновых вод и водовмещающих пород Новобибеевского проявления.

### Материалы и методы

За три года исследований (2019–2021) была отобрана 21 проба подземных вод из скважин, которые расположены непосредственно в селе, 5 проб – в пределах разрабатываемого карьера бутового камня «Новобибеевский» и 3 пробы – из реки Ояш (рис. 1, *б*). Лабораторное изучение химического состава методами титриметрии, ионной хроматографии, масс-спектрометрии с индуктивно связанной плазмой проводилось в ПНИЛ гидрогеохимии ИШПР ТПУ. Название химического типа дано по классификации С.А. Щукарева (в формулу добавлены макрокомпоненты с содержанием >10 %-экв) по оттеночному принципу от меньшего к большему.

Определение комплекса величин δD, $\delta^{18}$O, $\delta^{13}C_{DIC}$ вод и растворенного неорганического углерода (Dissolved Inorganic Carbon (DIC)) проводилось в центре коллективного пользования ИГМ СО РАН с помощью прибора Isotope Ratio Mass Spectrometer Finnigan™ MAT 253, снабженного приставками пробоподготовки H/Device (для определений δD) и GasBench II (для определений $\delta^{18}$O и $\delta^{13}C_{DIC}$). Значения $\delta^{13}C_{DIC}$, δD и $\delta^{18}$O измерялись по известным методикам [35–38] относительно мировых стандартов: VSMOW2; SLAP2; GISP – для анализа водорода и кислорода; NBS-18; NBS-19 – для анализа углерода. Ошибка определения изотопного состава стандартов по углероду и кислороду – не более 0,1 ‰, по водороду – не более 2 ‰. Для удаления песка, мелкодисперсных взвесей и возможных примесей на месте отбора пробы фильтровались через нейлоновый фильтр (Nylon-0,45/25), собирались в герметичные пробирки 50 мл, пробки обматывались парафильмом (parafilm) для минимизации газообмена с окружением при транспортировке и хранении. Измерение содержаний $^{222}$Rn в водах проводилось на комплексе «Альфарад плюс» в лаборатории гидрогеологии осадочных бассейнов Сибири ИНГГ СО РАН.

В комплекс полевых исследований 2020 г. также входили геофизические работы методом электротомографии. Исследования производились с применением электроразведочной аппаратуры Скала-48 с 48 электродами и шагом между ними 5 м по электроразведочной схеме Шлюмберже.

Разделение данных на однородные геохимические совокупности по процессам формирования состава с оценкой интенсивности их проявления выполнено на основе соотношения химических элементов в водах. Коэффициенты Ca/Na, Ca/Mg, Ca/Si, Mg/Si, Na/Si использованы для оценки особенностей обогащения вод за счет процессов гидролиза алюмосиликатов и конгруэнтного растворения карбонатов; $SO_4$/Cl>>1 и rNa/rCl>>1 – гидролиза алюмосиликатов и окисления сульфидных минералов; пропорциональное увеличение значений $SO_4$/Cl=1, rNa/rCl≥1, Ca/Na>0 – испарительного концентрирования.

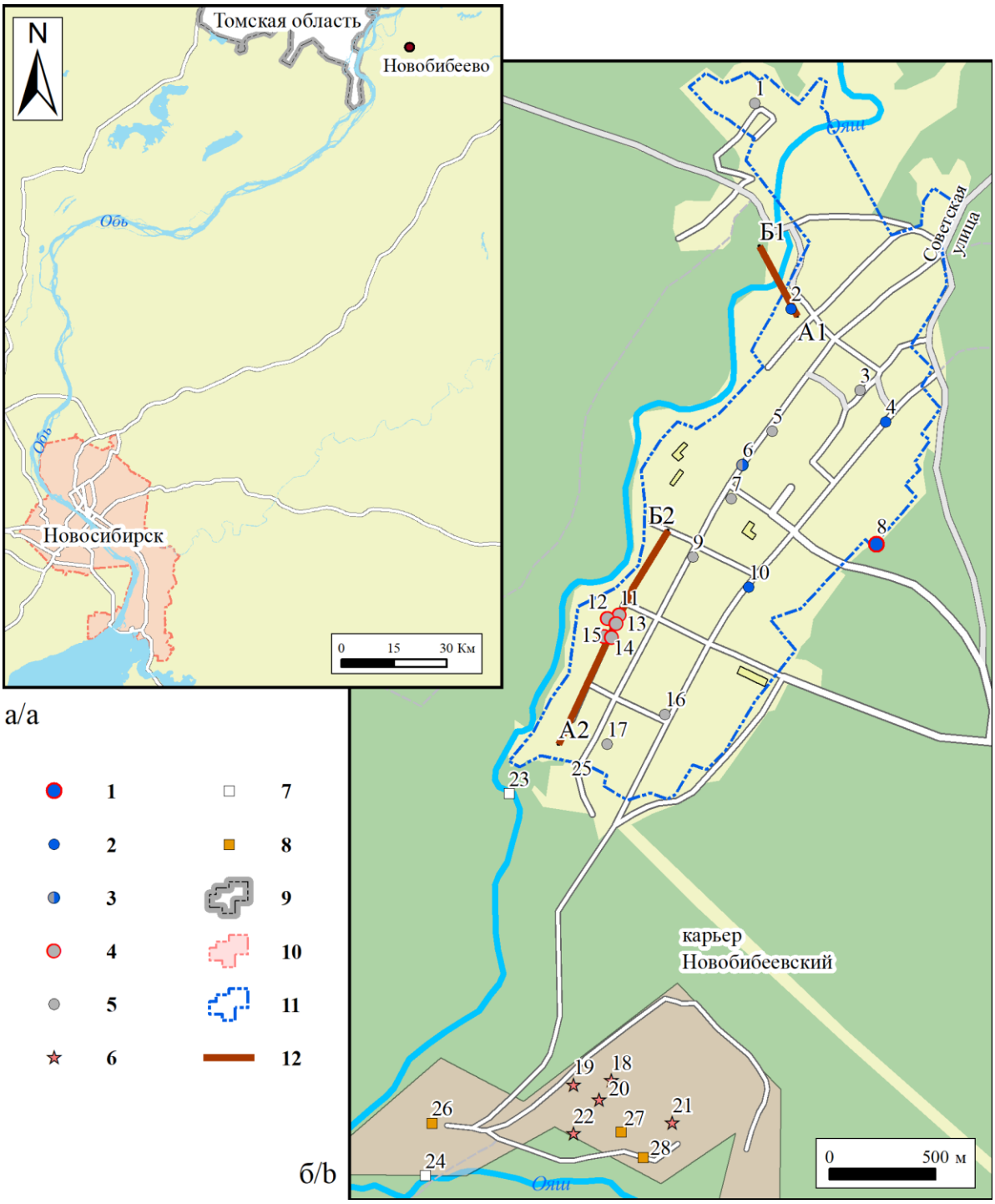



***Рис. 1.*** *Местоположение Новобибеевского проявления радоновых вод (а) и изученных объектов в его пределах (б). Воды: 1–5 – подземные: 1 – трещинно-жильные воды гранитоидов (группа I), с аномальной активностью радона; 2 – трещинно-жильные воды гранитоидов (группа I); 3 – I и II типов; 4 – воды зоны региональной трещиноватости гранитоидов в условиях антропогенного влияния (группа II) с аномальной активностью радона; 5 – воды зоны региональной трещиноватости гранитоидов в условиях антропогенного влияния (группа II); 6 – поверхностные воды в условиях техногенной нарушенности (группа III); 7 – поверхностные воды реки Ояш (группа IV); 8 – место отбора образцов горных пород; границы: 9 – Новосибирской области; 10 – г. Новосибирска; 11 – с. Новобибеево; 12 – линия геофизического профиля*

***Fig. 1.*** *Location of the Novobibeevo occurrence of radon-rich waters (a) and the studied objects within its boundaries (b). Waters: 1–5 – groundwaters: 1 – fracture-vein waters in granitoids (group I), with anomalous radon activity; 2 – fracture-vein waters in granitoids (group I); 3 – I and II types; 4 – waters of the zone of regional fracturing of gra-nitoids under anthropogenic impact (group II) with anomalous radon activity; 5 – waters of the zone of regional fracturing of granitoids under anthropogenic impact (group II); 6 – surface waters under the conditions of techno-genic disturbance (group III); 7 – surface waters of the Oyash river (group IV); 8 – rock sampling site; boundaries of: 9 – the Novosibirsk region; 10 – Novosibirsk city; 11 – Novobibeevo settlement; 12 – the geophysical profile line*

Для выявления степени концентрирования химических элементов в природных водах были рассчитаны коэффициенты концентрации ($Kk_i$) и водной миграции по А.И. Перельману ($Kx_1$). Первый рассчитывается как: $Kk_i = \frac{m_x}{n_x}$, где $m_x$ – содержание элемента в воде; $n_x$ – кларк литосферы в % (по Н.А. Григорьеву [39]). Второй: $Kx_1 = \frac{m_x \cdot 100}{a \cdot n_x}$, где $m_x$ – содержание элемента в воде (мг/дм$^3$); а – минерализация (мг/дм$^3$) и $n_x$ – кларк литосферы в %.

## Результаты и обсуждение

### Гидрогеологическое строение

Село Новобибеево находится на территории Болотнинского района Новосибирской области на правом берегу р. Обь. Непосредственно по территории Новобибеево протекает р. Ояш, впадающая в р. Обь в 3,5 км северо-западнее села. В геоморфологическом отношении исследуемая территория представлена структурами, приуроченными к хорошо проработанным долинам р. Ояш, имеющим плоский тальвег, покрытый пойменным аллювием. Глубина вреза долины по отношению к водоразделам составляет 50–100 м.

Геологический разрез села Новобибеево представлен верхнепалеозойскими гранитоидами, породами нижнего карбона и верхнего девона, палеогеновой, неогеновой и четвертичной систем и отложениями коры выветривания [40].

В гидрогеологическом разрезе установлены безнапорные воды палеозойского фундамента, представленного гранитоидами Обского массива, в состав которых входят серые и розовато-серые порфировидные граниты верхнепалеозойского возраста среднемелкозернистые, реже гранодиориты и прорывающие их дайки долеритов. Интрузивные породы разбиты сетью трещин, образующих единую обводненную зону трещинно-жильных вод, водообильность которой крайне мала. Водообильность скважин варьирует от 0,15 до 0,26 л/с при понижении уровня от 18 до 33 м. При проведении откачек максимальное понижение уровня в скважинах достигалось практически сразу, на его полное восстановление уходило около двух суток. Вскрытая мощность обводненных гранитоидов достигает 120 м. Они перекрываются водоносным комплексом рыхлых осадочных отложений четвертичного возраста мощностью до 15 м, представленных аллювиальными отложениями р. Ояш, включая русловые, пойменные, первой и второй надпойменных террас и субэральные нижне-средненеоплейстоценовые отложения краснодубровской свиты. Кора выветривания гранитоидов на исследуемой территории сохранилась лишь в виде отдельных, небольших по площади участков, что объясняет гидравлическую взаимосвязь между водоносными горизонтами по всей площади их распространения. Абсолютные отметки зеркала подземных вод уменьшаются от 196,3 до 187,4 м в направлении русла р. Ояш, урез которой находится на уровне 186,9 м.

Особенности гидрогеологического строения изучаемой территории хорошо видны на геоэлектрических разрезах по профилям А1–Б1 и А2–Б2 (рис. 1, *б*, рис. 2). Согласно первому разрезу, мощность рыхлых отложений увеличивается в направлении русла р. Ояш от менее чем 5 м в интервале 0–70 м по профилю исследования до 5–7 м в интервале 70–120 м. Ниже, согласно данным инверсии, залегают высокоомные (1000–2000 Ом·м) толщи – верхнепалеозойские гранитоиды. Мощность этой зоны составляет 10–15 м. Высокие значения УЭС, вероятнее всего, говорят о весьма низкой трещиноватости и обводненности пород. Интервал глубин 15–70 м характеризуется относительно низкими значениями УЭС (20–100 Ом·м). Объяснение этому может быть только одно – наличие обводненной зоны трещиноватости в гранитоидах. Таким образом, можно судить о глубине залегания и мощности зоны трещиноватости: кровля залегает на глубине 15 м, подошва – глубже 45 м.

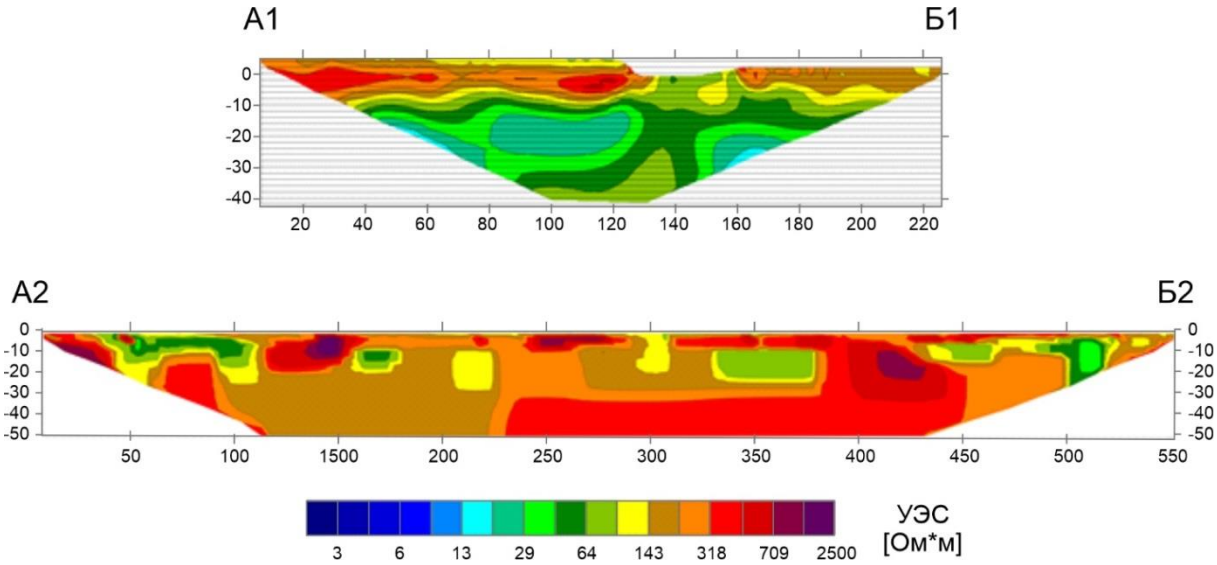



***Рис. 2.*** *Геоэлектрические разрезы по профилям А1–Б1, А2–Б2, схема исследования Шлюмберже*

***Fig. 2.*** *Geoelectric sections along А1–Б1, А2–Б2 profiles, investigation scheme: Schlumberger*

Второй геоэлектрический разрез существенно отличается от рассмотренного выше – он в целом значительно более высокоомный, с отдельными относительно проводящими зонами. Участки повышенной трещиноватости в верхней и средней частях разреза характеризуются значениями УЭС от 40 до 100 Ом·м. Нижняя часть является высокоомной (значения УЭС от 300 Ом·м), что говорит о прочности пород и отсутствии в них свободной воды на глубинах более 30 м. Кроме того, в верхней части разреза хорошо прослеживаются водообильные зоны интервалах 40–110 и 500–520 м по профилю.

### Геохимия природных вод

Анализ имеющихся данных по составу природных вод позволил выделить четыре геохимические совокупности (группы вод): трещинно-жильные воды гранитоидов (группа I), воды зоны региональной трещиноватости гранитоидов в условиях антропогенного влияния (группа II), поверхностные воды в условиях техногенной нарушенности (группа III) и поверхностные воды реки Ояш (группа IV). Первые две геохимические группы природных вод, связанных с гранитными массивами, впервые выделены нами ранее [26].

Первые (I) изучены в водозаборной (централизованного водоснабжения поселка) скважине и в скважинах на улицах Молодежная, Советская, Школьная и (табл. 1). Они характеризуются $HCO_3$ Mg-Ca составом (рис. 3) с величиной общей минерализации от 483 до 594 мг/дм$^3$. Содержания кремния не превышают 13,30 мг/дм$^3$. Геохимические параметры среды варьируют от восстановительной до окислительной обстановки с величинами Eh от –81,2 до +56,0 мВ; pH от 7,3 до 7,5 и $O_{2раств.}$ от 1,62 до 7,76 мг/дм$^3$. Средние значения геохимических коэффициентов для данной группы составляют: Ca/Si 11,49; Mg/Si 2,48; Na/Si 1,25; Si/Na 0,87; Ca/Na 10,02; Ca/Mg 4,76; rNa/rCl 8,79 и $SO_4$/Cl 4,35, что свидетельствует о накоплении в водах кальция, магния и протекании процессов окисления сульфидов. Содержания радионуклидов составляют (мг/дм$^3$): $^{238}$U от $5{,}25\cdot10^{-4}$ до $3{,}97\cdot10^{-2}$ и $^{232}$Th от $4{,}04\cdot10^{-7}$ до $2{,}43\cdot10^{-5}$. Отношение $^{232}$Th/$^{238}$U варьирует в интервале от $2{,}25\cdot10^{-4}$ до $2{,}92\cdot10^{-2}$ при среднем $6{,}79\cdot10^{-3}$. Активность радона в водах изменяется в широких пределах от 6,5 до 97,0 Бк/дм$^3$. Невысокие концентрации $^{222}$Rn в водозаборной скважине (№ 2 на рис. 1, *б*) связаны с высокой трещиноватостью выветрелых гранитов.

Наиболее многочисленная вторая группа (II) (табл. 1) представлена в основном водами $HCO_3$ Mg-Ca состава. Величина общей минерализации изменяется в интервале от 385 до 818 мг/дм$^3$, а содержания кремния – от 5,77 до 9,85 мг/дм$^3$. Геохимические условия среды отвечают окислительной обстановке с Eh от 63,4 до 212,7; pH от 6,6 до 7,5 и $O_{2раств.}$ от 1,80 до 7,89 мг/дм$^3$. По отношению к первой группе возрастают средние значения геохимических коэффициентов: Ca/Si 16,43; Na/Si 2,21; Ca/Mg 9,95, снижаются: Mg/Si 2,21; Si/Na 0,62; Ca/Na 9,84; rNa/rCl 0,89 и $SO_4$/Cl 1,78. При протекании процессов формирования состава вод второй группы существенную роль играют кальциевые алюмосиликаты. Широко проявлены процессы антропогенного загрязнения подземных вод, что отмечается в росте концентраций (мг/дм$^3$): $SO_4$ до 157; Cl до 66,8; $NO_3$ до 259; Na до 37,6; Br до 0,13; Sr до 1,49 и других. Содержания радионуклидов составляют (мг/дм$^3$): $^{238}$U от $1{,}05\cdot10^{-3}$ до $1{,}25\cdot10^{-1}$ и $^{232}$Th от $1{,}86\cdot10^{-7}$ до $4{,}16\cdot10^{-5}$. $^{232}$Th/$^{238}$U отношение в радоновых водах изменяется в интервале от $2{,}63\cdot10^{-5}$ до $3{,}20\cdot10^{-3}$ при среднем $9{,}52\cdot10^{-4}$. Активность радона в водах варьирует в широких пределах от 4,0 до 429,0 Бк/дм$^3$. Наиболее высокая активность $^{222}$Rn выявлена в скважинах на ул. Набережная (№ 11–15 на рис. 1, *б*), которая находится в диапазоне от 163 до 429 Бк/дм$^3$ и зависит от величины инфильтрационного питания атмосферными осадками.

Третья геохимическая разновидность (группа III) при общей схожести химического состава отличается от первых значительным ростом сульфат-иона с долей до 10,1–20,4 %-экв (табл. 1, рис. 3) и локализована в пределах разрабатываемого карьера «Новобибеевский» (рис. 1, *б*). Величина их общей минерализации составляет 385–461 мг/дм$^3$. Содержание кремния изменяется в интервале от 5,02 до 9,60 мг/дм$^3$ (рис. 1, *б*). Геохимические параметры среды отвечают окислительной обстановке с величинами Eh от +107,8 до +145,6 мВ, pH от 7,8 до 8,6 и $O_{2раств.}$ от 6,49 до 14,38 мг/дм$^3$. Процессы накопления в водах магния, кальция и натрия отражаются в величинах средних геохимических коэффициентов, которые составляют: Ca/Si 9,55; Mg/Si 3,07; Na/Si 2,97; Si/Na 0,39; Ca/Na 3,51; Ca/Mg 3,33; rNa/rCl 8,97 и $SO_4$/Cl 11,49. Также отмечаются признаки антропогенного загрязнения, связанные с эксплуатацией карьера. Выявлены высокие значения (мг/дм$^3$): $NO_2$ до 1,01; $NO_3$ до 51,70; Na до 20,40; $NH_4$ до 0,82. Содержания радионуклидов составляют (мг/дм$^3$): $^{238}$U от $1{,}02\cdot10^{-2}$ до $1{,}16\cdot10^{-2}$ и $^{232}$Th от $2{,}60\cdot10^{-6}$ до $3{,}10\cdot10^{-5}$. Отношение $^{232}$Th/$^{238}$U составляет $2{,}43\cdot10^{-4}$–$2{,}69\cdot10^{-3}$ при среднем $1{,}83\cdot10^{-3}$. Активность радона в водах варьирует в пределах от 2 до 39 Бк/дм$^3$ и не превышает нормы ПДК.

Воды реки Ояш (группа IV) (табл. 1) характеризуются в основном $HCO_3$ Na-Mg-Ca составом. Величина общей минерализации изменяется от 407 до 466 мг/дм$^3$, а содержания кремния – от 1,22 до 2,87 мг/дм$^3$. Геохимические параметры среды отвечают окислительной обстановке с величинами Eh от +120,1 до +150,0 мВ, pH от 8,4 до 8,5 и $O_{2раств.}$ от 7,45 до 9,53 мг/дм$^3$. Средние значения геохимических коэффициентов составляют: Ca/Si 41,62; Mg/Si 8,90; Na/Si 10,49; Si/Na 0,12; Ca/Na 4,24; Ca/Mg 17,82; rNa/rCl 8,44 и $SO_4$/Cl 3,20, что также говорит о протекании процессов накопления в них магния, кальция и натрия. Содержания радионуклидов составляют (мг/дм$^3$): $^{238}$U от $2{,}27\cdot10^{-3}$ до $2{,}77\cdot10^{-3}$ и $^{232}$Th от $6{,}92\cdot10^{-7}$ до $1{,}75\cdot10^{-5}$. $^{232}$Th/$^{238}$U отношение в радоновых водах изменяется в интервале от $2{,}50\cdot10^{-4}$ до $7{,}7\cdot10^{-3}$ при среднем $3{,}49\cdot10^{-3}$. Активность радона в водах варьирует от 1 до 12 Бк/дм$^3$. Речные воды также подвержены существенному влиянию процессов антропогенного загрязнения, что отражается в первую очередь ростом в растворе концентраций натрия и магния.

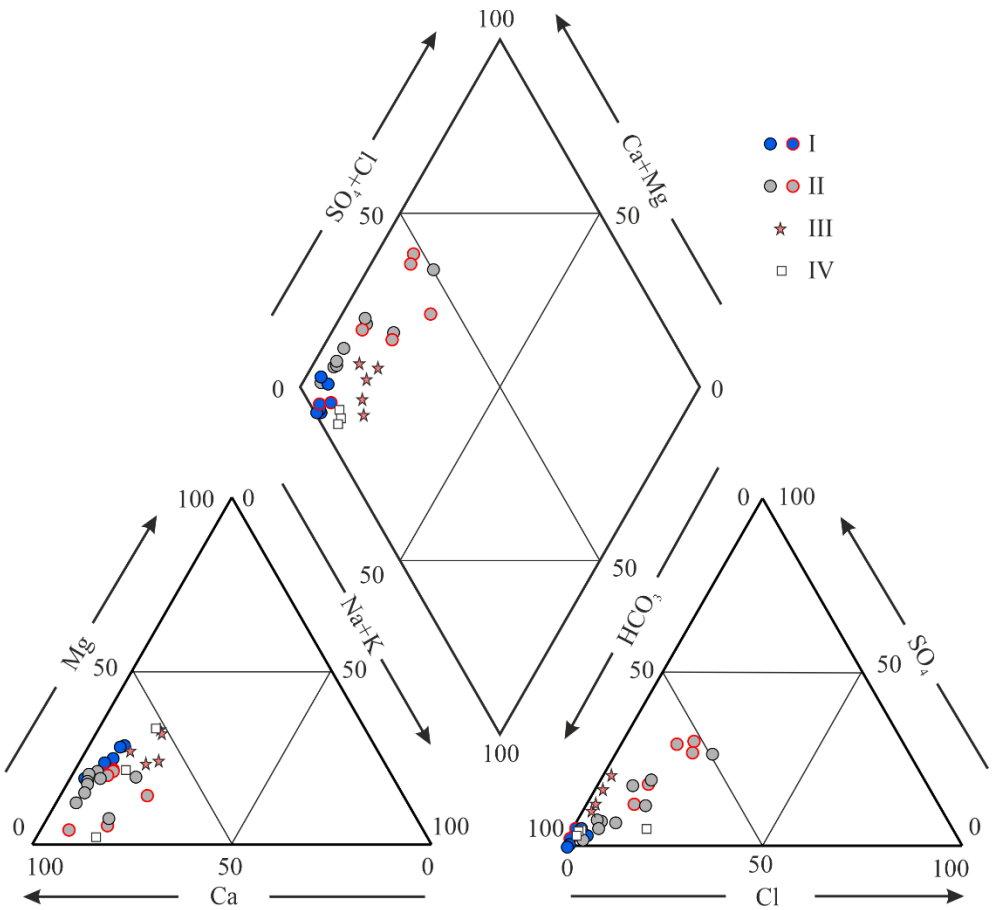



***Рис. 3.*** *Диаграмма Пайпера химического состава Новобибеевского проявления радоновых вод. Условные обозначения – на рис. 1*

***Fig. 3.*** *Piper diagram of the chemical composition of the Novobibeevo radon-rich waters occurrence. For designations, see Fig. 1*

Изучение микрокомпонентного состава природных вод села Новобибеево показало, что с ростом общей минерализации в растворе концентрируются Li, Cr, Zn, Br, Sr и U, а содержания B, V, As, Nb, Mo, Au снижаются. На спектре их распределения (рис. 4, *а*) наибольшие концентрации (мг/дм3) установлены у: Si до 8,85, Mn до 0,22, Fe до 0,34, Sr до 0,77, Ba до 0,13.

Для оценки степени накопления в водах химических элементов были рассчитаны коэффициенты концентрации, которые отражают отношение содержаний элементов в воде к вмещающим породам или к кларку литосферы и коэффициенты водной миграции (по А.И. Перельману) [41]. Согласно рассчитанным коэффициентам концентрации установлено, что в водах в большей мере накапливаются Br (0,03), I (0,03), Se (0,02), Te (0,02), Re (0,01) и U (0,01) (рис. 4, *б*). Это коррелируется с рассчитанными коэффициентами водной миграции (рис. 4, *в*): очень сильной интенсивностью обладают: I (355,4), Se (53,4), Br (45,9), Te (30,2), Re (28,5) и U (12,6), сильной: B (6,5), Sr (5,1), Mo (2,9), средней: Li (0,60), Zn (0,60), Ba (0,49), Sb (0,41), Hg (0,41), Pd (0,33), As (0,17), P (0,16), Cu (0,14) и слабой (инертной): Au (0,092), Cd (0,092), Sc (0,087), Rb (0,086), Cs (0,086), W (0,084), Co (0,069), Cr (0,060), Si (0,059), Ni (0,049), Sn (0,045), V (0,025), TI (0,025), Pb (0,024), Ge (0,019), Fe (0,016), Bi (0,012), Be (0,007), Ga (0,005), Th (0,004), Al (0,002), Ti (0,001), Hf (0,001),Y (0,001), Zr (0,0009), Nb (0,0006).

Анализ имеющихся данных выявил особенности вертикальной гидрогеохимической зональности и состава фоновых трещинно-жильных вод гранитоидов, изученных в скважине на ул. Молодежная (№ 10 на рис. 1, *б*). Как показали результаты изучения быстроизменяющихся параметров, мощность зоны активной циркуляции подземных вод составляет около 20 м, глубже превалирует затрудненный водообмен с восстановительными условиями геохимической обстановки (Eh от –81,2 до –28,0 мВ; $O_{2раств.}$ от 1,83 до 4,14 мг/дм$^3$). Наблюдается инверсия гидрогеохимического разреза и снижение величины общей минерализации от 385–818 мг/дм$^3$ на глубинах 7,5–20 м до 483–594 мг/дм$^3$ на глубинах 56–70 м. Это сопровождается снижением концентраций $SO_4$, Cl, $NO_3$, Ca, Na, Br, Li, B, Al, V, Cr, As, Se, Sr, I и закономерным ростом F, Sc, Mn, Ga, Rb, Zr, Ba. Высокие содержания последних связаны с водовмещающими гранитами, поскольку в них присутствуют минералы-концентраторы целого ряда химических элементов: флюорит (F, Sc), биотит (Mn, Rb, Ba, Ga), апатит (Sc), циркон (Zr) и сфен (Mn, Zr, F).

***Таблица 1.*** *Химический состав природных вод Новобибеевского проявления радоновых вод*

***Table 1.*** *Chemical composition of natural waters of the Novobibeevo radon-rich waters occurrence*

| № на рис. 1, *б*<br>No. in Fig. 1, *b* | Дата отбора<br>Sampling date | pH | Eh | $O_2$ | П.ок.* | $HCO_3^-$ | $SO_4^{2-}$ | $Cl^-$ | $Ca^{2+}$ | $Mg^{2+}$ | $Na^+$ | $K^+$ | Si | M | $^{222}Rn$ | $^{232}Th$ | $^{238}U$ | Химический тип***<br>Chemical type |
|---|---|---|---|---|---|---|---|---|---|---|---|---|---|---|---|---|---|---|
| | | | мВ/mV | мг/дм$^3$<br>mg/dm$^3$ | | | | | | | | | | | Бк/дм$^3$/Bq/dm$^3$ | мг/дм$^3$<br>mg/dm$^3$ | | |
| *Трещинно-жильные воды гранитоидов (группа I)/Fracture-vein waters in granitoids (group I)* | | | | | | | | | | | | | | | | | | |
| 2 | 12.11.2019 | 7,5 | –57,2 | 4,22 | 1,10 | 378 | 2 | 3 | 78 | 22 | 12 | 1,3 | 7,22 | 498 | 34,7 | $6{,}80\cdot10^{-6}$ | $5{,}51\cdot10^{-4}$ | $HCO_3$ Mg-Ca |
| 2 | 28.07.2020 | 7,4 | –67,4 | 3,81 | 1,00 | 376 | | 2 | 84 | 20 | 11 | 1,3 | 7,94 | 493 | 6,5 | $1{,}54\cdot10^{-5}$ | $5{,}25\cdot10^{-4}$ | $SO_4$-$HCO_3$-Mg-Ca |
| 4 | 28.07.2020 | 7,4 | 56,0 | 4,13 | 0,52 | 312 | 14 | 3 | 126 | 20 | 6 | 2,0 | 7,40 | 483 | 38,0 | $7{,}18\cdot10^{-6}$ | $6{,}29\cdot10^{-3}$ | $HCO_3$ Mg-Ca |
| 6 | 12.11.2019 | 7,3 | –46,9 | 1,86 | 0,74 | 430 | 11 | 12 | 105 | 22 | 10 | 2,6 | 6,73 | 594 | 34,3 | $2{,}43\cdot10^{-5}$ | $3{,}97\cdot10^{-2}$ | $HCO_3$ Mg-Ca |
| 8 | 28.07.2020 | 7,3 | –28,0 | 4,15 | 0,76 | 405 | 8 | 1 | 96 | 17 | 10 | 2,4 | 13,30 | 539 | 56,5 | $4{,}04\cdot10^{-7}$ | $1{,}80\cdot10^{-3}$ | $HCO_3$ Mg-Ca |
| 8 | 03.07.2019 | 7,3 | –63,2 | 7,76 | 0,60 | 402 | 17 | 2 | 96 | 19 | 15 | 2,1 | 11,77 | 553 | 97,0 | $4{,}35\cdot10^{-6}$ | $1{,}75\cdot10^{-3}$ | $HCO_3$ Mg-Ca |
| 10 | 12.11.2019 | 7,4 | –81,2 | 1,62 | 0,50 | 402 | 2 | 3 | 84 | 23 | 12 | 1,3 | 7,59 | 528 | 57,0 | $1{,}03\cdot10^{-6}$ | $6{,}79\cdot10^{-4}$ | $HCO_3$ Mg-Ca |
| *Воды зоны региональной трещиноватости гранитоидов в условиях антропогенного влияния (группа II)*<br>*Waters of the zone of regional fracturing of granitoids under anthropogenic impact (group II)* | | | | | | | | | | | | | | | | | | |
| 1 | 12.11.2019 | 7,5 | 212,7 | 5,78 | 0,13 | 400 | 7 | 10 | 105 | 18 | 6 | 1,6 | 5,77 | 547 | 6,0 | $1{,}86\cdot10^{-7}$ | $1{,}88\cdot10^{-3}$ | $HCO_3$ Mg-Ca |
| 3 | 28.07.2020 | 7,3 | 118,7 | 5,77 | 0,72 | 359 | 24 | 24 | 128 | 19 | 9 | 1,6 | 8,43 | 565 | 8,0 | <ПО** | $4{,}71\cdot10^{-3}$ | $HCO_3$ Mg-Ca |
| 5 | 28.07.2020 | 7,4 | 70,6 | 5,70 | 0,84 | 376 | 18 | 15 | 120 | 17 | 9 | 1,4 | 8,85 | 556 | 7,0 | $7{,}58\cdot10^{-6}$ | $4{,}02\cdot10^{-3}$ | $HCO_3$ Mg-Ca |
| 6 | 28.07.2020 | 7,3 | 63,4 | 1,80 | 0,64 | 386 | 27 | 12 | 108 | 20 | 9 | 2,1 | 7,01 | 564 | 17,0 | <ПО** | $1{,}51\cdot10^{-2}$ | $HCO_3$ Mg-Ca |
| 7 | 28.07.2020 | 7,2 | 122,3 | 5,72 | 1,76 | 405 | 75 | 28 | 170 | 28 | 19 | 1,6 | 7,32 | 726 | 4,0 | $4{,}65\cdot10^{-6}$ | $4{,}80\cdot10^{-3}$ | $SO_4$-$HCO_3$ Mg-Ca |
| 9 | 28.07.2020 | 7,2 | 146,8 | 6,49 | 0,68 | 415 | 28 | 16 | 142 | 13 | 9 | 1,6 | 8,71 | 625 | 15,0 | $2{,}79\cdot10^{-6}$ | $7{,}60\cdot10^{-3}$ | $HCO_3$ Mg-Ca |
| 11 | 27.07.2021 | 7,3 | 115,1 | 2,80 | 1,60 | 358 | 140 | 72 | 156 | 30 | 24 | 3,4 | 7,47 | 818 | 429,0 | $4{,}16\cdot10^{-5}$ | $1{,}14\cdot10^{-1}$ | Cl-$SO_4$-$HCO_3$<br>Na-Mg-Ca |
| 12 | 03.07.2019 | 7,0 | 82,4 | 7,89 | 2,26 | 209 | 86 | 29 | 98 | 14 | 38 | 2,0 | 6,86 | 575 | 164,0 | <ПО** | $7{,}79\cdot10^{-3}$ | Cl-$SO_4$-$HCO_3$<br>Mg-Na-Ca |
| 13 | 28.07.2020 | 7,1 | 79,6 | 3,10 | 1,16 | 342 | 157 | 67 | 153 | 27 | 21 | 3,5 | 8,76 | 770 | 167,5 | $3{,}30\cdot10^{-6}$ | $1{,}25\cdot10^{-1}$ | Cl-$SO_4$-$HCO_3$ Mg-Ca |
| 14 | 16.10.2020 | 7,1 | 163,8 | 5,75 | 1,24 | 378 | 48 | 34 | 144 | 5 | 12 | 2,9 | 9,15 | 624 | 185,0 | $4{,}06\cdot10^{-6}$ | $9{,}98\cdot10^{-3}$ | Cl-$SO_4$-$HCO_3$ Ca |
| 14 | 27.07.2021 | 7,2 | 87,2 | 5,59 | 2,20 | 307 | 68 | 32 | 136 | 9 | 30 | 2,5 | 6,43 | 679 | 245,0 | $1{,}19\cdot10^{-5}$ | $9{,}55\cdot10^{-3}$ | Cl-$SO_4$-$HCO_3$ Na-Ca |
| 15 | 16.10.2020 | 7,0 | 154,0 | 3,48 | 1,40 | 285 | 58 | 29 | 104 | 5 | 23 | 3,2 | 9,85 | 509 | 143,5 | $3{,}47\cdot10^{-5}$ | $1{,}08\cdot10^{-2}$ | Cl-$SO_4$-$HCO_3$ Na-Ca |
| 16 | 28.07.2020 | 7,1 | 150,0 | 5,62 | 0,76 | 361 | 46 | 41 | 164 | 20 | 14 | 1,2 | 9,75 | 647 | 13,0 | <ПО** | $3{,}63\cdot10^{-3}$ | $SO_4$-Cl-$HCO_3$ Mg-Ca |
| 17 | 28.07.2020 | 6,6 | 131,4 | 6,58 | 3,56 | 132 | 56 | 37 | 103 | 20 | 19 | 18,2 | 9,24 | 385 | 28,5 | <ПО** | $1{,}05\cdot10^{-3}$ | Cl-$SO_4$-$HCO_3$<br>Na-Mg-Ca |
| *Поверхностные воды в условиях техногенной нарушенности (группа III)/Surface waters under the conditions of technogenic disturbance (group III)* | | | | | | | | | | | | | | | | | | |
| 18 | 03.07.2019 | 8,0 | 111,0 | 7,91 | 2,24 | 248 | 28 | 3 | 65 | 16 | 20 | 3,0 | 6,49 | 434 | 15,0 | <ПО** | $1{,}02\cdot10^{-2}$ | $SO_4$-$HCO_3$<br>Na-Mg-Ca |
| 19 | 03.07.2019 | 8,6 | 121,7 | 14,39 | 3,00 | 232 | 48 | 3 | 58 | 22 | 20 | 2,3 | 5,02 | 433 | 6,0 | $1{,}76\cdot10^{-5}$ | $1{,}02\cdot10^{-2}$ | $SO_4$-$HCO_3$<br>Na-Mg-Ca |
| 20 | 03.07.2019 | 7,9 | 139,7 | 7,88 | 1,70 | 256 | 40 | 3 | 62 | 25 | 20 | 2,9 | 5,72 | 461 | 39,0 | $2{,}90\cdot10^{-5}$ | $1{,}08\cdot10^{-2}$ | $SO_4$-$HCO_3$<br>Na-Mg-Ca |
| 21 | 28.07.2020 | 8,1 | 145,6 | 7,44 | 1,44 | 268 | 43 | 3 | 72 | 20 | 13 | 4,5 | 9,60 | 423 | 2,0 | $3{,}10\cdot10^{-5}$ | $1{,}16\cdot10^{-2}$ | $SO_4$-$HCO_3$<br>Na-Mg-Ca |
| 22 | 03.07.2019 | 7,8 | 107,8 | 6,49 | 1,80 | 224 | 20 | 3 | 55 | 15 | 20 | 3,3 | 7,00 | 385 | 25,0 | $2{,}60\cdot10^{-6}$ | $1{,}07\cdot10^{-2}$ | $SO_4$-$HCO_3$<br>Na-Mg-Ca |
| *Поверхностные воды реки Ояш (группа IV)/Surface waters of the Oyash river (group IV)* | | | | | | | | | | | | | | | | | | |
| 23 | 28.07.2020 | 8,5 | 150,0 | 8,70 | 3,88 | 322 | 8 | 3 | 60 | 1 | 12 | 0,9 | 1,24 | 407 | 12,0 | $1{,}75\cdot10^{-5}$ | $2{,}27\cdot10^{-3}$ | $HCO_3$-Na-Ca |
| 23 | 27.07.2021 | 8,5 | 120,1 | 7,45 | 4,50 | 278 | 11 | 4 | 72 | 15 | 16 | 1,0 | 2,87 | 420 | 0,0 | $5{,}85\cdot10^{-6}$ | $2{,}36\cdot10^{-3}$ | $HCO_3$ Na-Mg-Ca |
| 24 | 03.07.2019 | 8,4 | 148,4 | 9,53 | 4,30 | 341 | 13 | 3 | 63 | 25 | 20 | 0,5 | 1,22 | 466 | 1,0 | $6{,}92\cdot10^{-7}$ | $2{,}77\cdot10^{-3}$ | $HCO_3$ Na-Mg-Ca |

*Примечание: * – перманганатная окисляемость; ** – меньше предела обнаружения; *** – название химического типа дано по классификации С.А. Щукарева (в формулу добавлены макрокомпоненты с содержанием >10 %-экв).*

*Note: * – permanganate oxidizability; ** – less than detection limit; *** – water chemical types named using the S.A. Schukarev classification (taking into consideration macrocomponents with content more than 10 %-eq).*

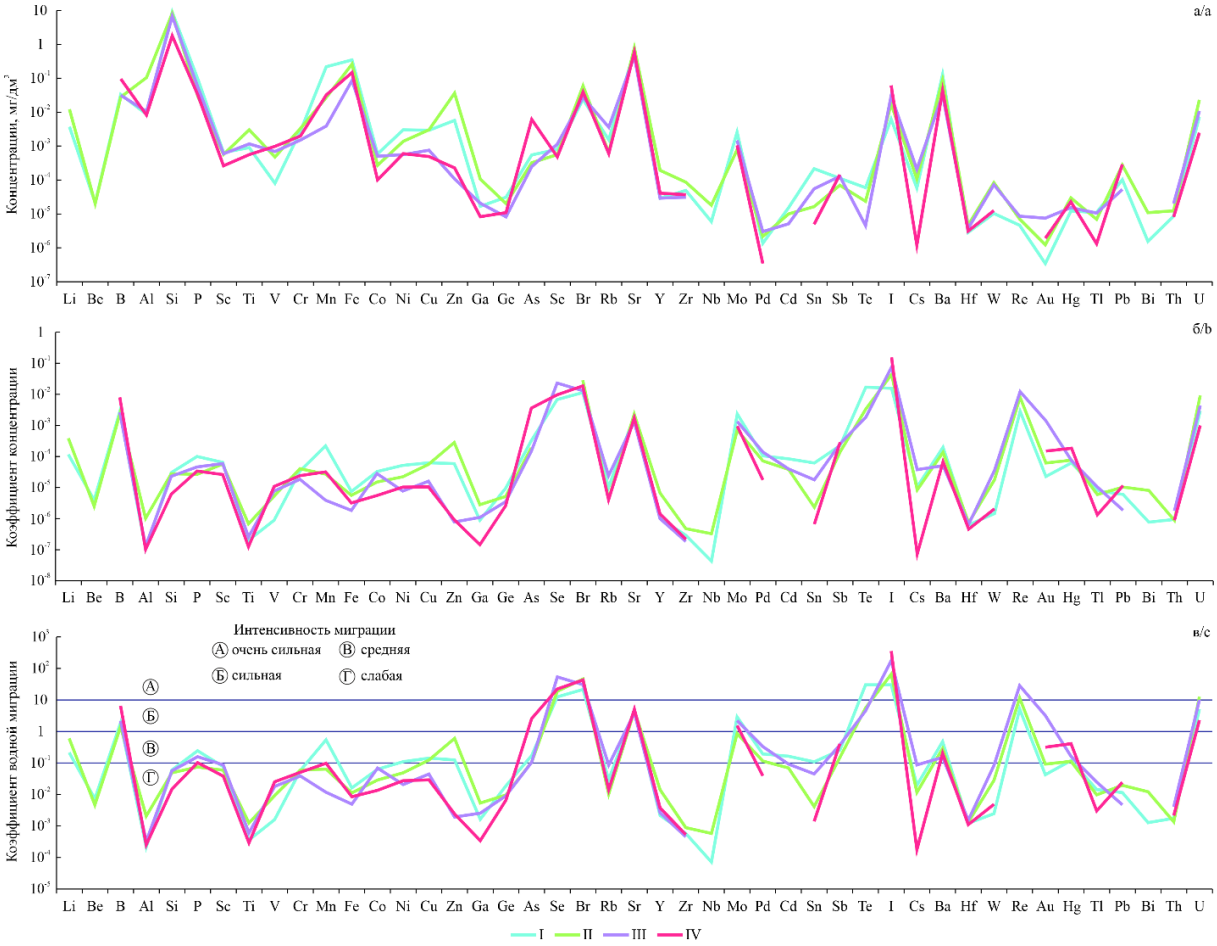



***Рис. 4.*** *Спектр распределения микрокомпонентов Новобибеевского проявления (а), распределение коэффициентов концентраций (б), ряды миграции микрокомпонентов в природных водах (в). I – трещинно-жильные воды гранитоидов; II – воды зоны региональной трещиноватости гранитоидов в условиях антропогенного влияния; III –поверхностные воды в условиях техногенной нарушенности; IV – поверхностные воды реки Ояш*

***Fig. 4.*** *Spectrum of trace elements distribution of Novobibeevo occurrence (a), distribution of concentration factors (b), microelements migration series in natural waters (c). I – fracture-vein waters in granitoids; II – waters of the zone of regional fracturing of granitoids under anthropogenic impact; III – surface waters under the conditions of technogenic disturbance; IV – surface waters of the Oyash river*

### Изотопия O, H и $C_{DIC}$ природных вод

Состав стабильных изотопов вод – δD и $\delta^{18}O$ – выступает прямым методом изучения их истории и на текущий момент стал неотъемлемой частью любых гидрогеологических исследований, поскольку позволяет выявить закономерности многих процессов, протекающих в закрытых или слишком масштабных для прямого наблюдения системах [42]. Установление источников влаги [38], генезиса вод [42, 43], процессов их переноса [44], смешения [45], испарения [46], изотопного обмена с окружающими породами и газами [45] – лишь краткий перечень задач, решаемых на основании данных по изотопному составу H и O вод. Дополнительную информацию о взаимодействии вод с окружением и, как следствие, об истории воды дает изотопный состав углерода в водорастворенной углекислоте – dissolved inorganic carbon (DIC). Значения $\delta^{13}C_{DIC}$ определяются широким спектром факторов влияния: источники DIC [47], фракционирование углерода $CO_2$ при переходе из газовой фазы в раствор, влияние процессов дегазации вод [48], изменение изотопного состава DIC при изотопном обмене с окружением, в ходе бактериального преобразования [47, 49] и многих других.

Изотопная характеристика отобранных проб приведена в табл. 2 и на рис. 5. Для всех изученных вод характерна слабокислая и слабощелочная среда (pH изменяется в диапазоне от 6,6 до 8,6), величина общей минерализации варьирует в диапазоне от 385 до 818 мг/л. Превалирующими анионами в большинстве вод выступают $HCO_3^-$ и $SO_4^{2-}$, содержание которых колеблется от 132 до 430 и от 2 до 157 мг/дм$^3$, соответственно, при мольном соотношении $SO_4^{2-}/HCO_3^-$ от 0,002 до 0,24. Углекислый газ и карбонат-ион в водах присутствуют либо в следовых количествах, либо ниже порога определения. Концентрация DIC в водах, рассчитанная как сумма диссоциатов угольной кислоты ($CO_2+HCO_3^-+CO_3^{2-}$), изменяется от 3,4 до 8,7 ммоль/дм$^3$. Воды характеризуются диапазоном значений δD и $\delta^{18}O$ от –139,4 до –112,5 ‰ и от –18,9 до –14,4 ‰, соответственно, при $\delta^{13}C$ от –14,0 до –7,0 ‰.

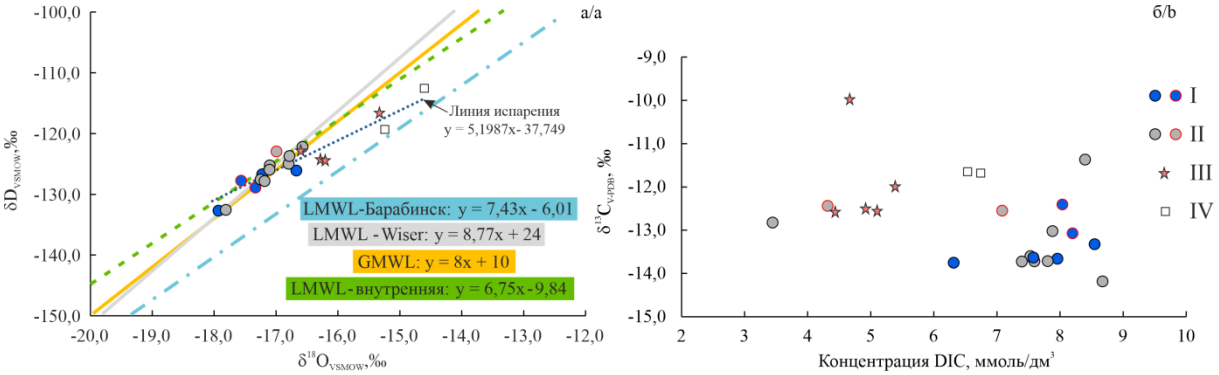



***Рис. 5.*** *Изотопный состав кислорода и водорода изученных вод относительно GWML [50] и локальных линий метеорных вод [51] (а); зависимость изотопного состава углерода от концентрации DIC в водах (б). Условные обозначения – на рис. 1*

***Fig. 5.*** *Isotope composition of oxygen and hydrogen in the studied waters with respect to GWML [50] and local lines of meteoric waters [51] (a); isotope composition of carbon depending on DIC concentration in waters (b). For designations, see Fig. 1*

Значения δD и $\delta^{18}O$ в изученных водах представлены относительно GMWL [50], LMWL для г. Новосибирска, основанной на данных за 1969–1990 гг. из международной базы данных Wiser [51], а также LMWL, построенной на собственных данных для метеорных осадков, изученных в 2020–2021 гг. Основной массив полученных точек (без учета поверхностных, активно испаряющихся вод) хорошо ложится на все указанные линии метеорных вод, что говорит о метеорном происхождении изученных вод. Ряд точек, отвечающих изотопному составу кислорода и водорода речных и карьерных вод, в определенной степени отклоняется от всех вышеперечисленных линий в сторону утяжеления изотопного состава водорода и кислорода, что является следствием испарения вод с поверхностей этих объектов [42, 43]. Комплекс соответствующих точек может быть охарактеризован общей локальной линией испарения: $\delta D=5{,}2\times\delta^{18}O-37{,}7$.

В работах [27, 28] авторы также проводили сравнение полученного изотопного состава O и H вод с линиями метеорных вод и в качестве LWML использовали локальные линии для г. Новосибирска за 1969–1990 гг. ($\delta D = 8{,}77\times\delta^{18}O+24{,}10$) [51] и для г. Барабинска за 1996–2000 гг. ($\delta D=7{,}43\times\delta^{18}O-6{,}01$) [51], находящегося в центральной части Новосибирской области. Для выявления причин различия локальных линий и коррекции известных данных в конце 2019 г. было принято решение сделать собственную оценку положения линии метеорных вод, первые результаты которой (для атмосферных осадков в Академгородке г. Новосибирска за 2020 г.) приводятся в настоящей работе: $\delta D=6{,}75\times\delta^{18}O-9{,}84$. Работа в этом направлении продолжается, и линия дополняется новыми данными за 2021 г. Из рис. 5, *а* видно, что полученная локальная линия метеорных вод вполне удовлетворительно описывает данные изотопного состава исследованных объектов, занимая промежуточное положение между известными локальными линиями метеорных вод.

Из представленных на рис. 5, *а* данных видно, что поверхностные воды отличаются закономерно более тяжелым изотопным составом кислорода и водорода (значения δD варьируют от –124 до –113 ‰ при $\delta^{18}O$ от –16,6 до –14,6 ‰), что обусловлено летним периодом отбора проб, поскольку для подземных вод характерен изотопный состав, усредненный по всему сезону, то есть включающий изотопно-легкие воды холодного периода года [42]. Для подземных вод наблюдается больший дефицит тяжелых изотопов кислорода-18 и дейтерия (значения δD варьируют от –133 до –122 ‰ при $\delta^{18}O$ от –17,9 до –16,4 ‰). При этом для ряда проб характерна очень малая вариация значений δD и $\delta^{18}O$ во времени, что хорошо прослеживается для объектов, опробованных в 2019 и 2020 гг.: пары проб № 1 и 6; 3 и 5; 2 и 11; 8 и 17 в табл. 2. В наибольшей степени изменения коснулись проб подземных вод №№ 6-1 и 6-2, отобранных из скважины наименьшей глубины – 7,5 м. По-видимому, в данном случае влияние свежих инфильтрационных вод было проявлено в наибольшей мере.

Поверхностные воды, собранные из р. Ояш в 2019 и 2020 гг., ожидаемо имеют более широкие вариации изотопного состава кислорода и водорода: различие значений δD и $\delta^{18}O$ составляют, соответственно, 6,0 и 0,6 ‰. Карьерные воды, за исключением озера у его обводненной стенки (проба № 20 в табл. 2: δD= –117 ‰, $\delta^{18}O$= –15,3 ‰), имеют узкое распределение изотопного состава кислорода и водорода: значения δD варьируют от –124 до –122 ‰ при $\delta^{18}O$ от –16,2 до –16,6 ‰. По значениям δD и $\delta^{18}O$ карьерные воды занимают промежуточное положение между подземными и речными водами (рис. 5, *а*). Это позволяет предположить участие в их питании двух источников: атмосферных осадков и подземных вод водоносного горизонта, близкого по изотопному составу к скважинам на ул. Набережная и Лесная (пробы 8, 9, 17 и табл. 2). Эту гипотезу также подтверждают концентрации радона в указанных водах.

Данные о содержании DIC в исследованных водах и его изотопном составе представлены в табл. 2 и на рис. 5, *б*. Потенциальными источниками DIC в природных водах могут служить атмосферный и почвенный $CO_2$, карбонатные осадочные породы, гидролиз алюмосиликатов, а также органическая (биогенная)

углекислота [47, 27, 52], которые впоследствии могут изменяться в ходе изотопного обмена, протекающего в процессах выветривания пород и обмена вод газами с окружением [52, 53].

Полученные значения $\delta^{13}C_{DIC}$ варьируют в диапазоне от –14,2 до –10,0 ‰ при содержании DIC от 3,4 до 8,7 ммоль/дм$^3$. Концентрация DIC в исследованных водах превышает его естественную концентрацию в дождевой воде ($10^{-2}$ ммоль/дм$^3$ [47]) на 2–3 порядка, что позволяет сделать вывод о незначительности вклада растворенного атмосферного углекислого газа в формировании DIC. Основным источником водорастворенной углекислоты в данном случае следует рассматривать почвенную углекислоту смешанного состава: диффузионную (близкую по изотопному составу углерода к атмосферному $CO_2$) и биогенную (с выраженным отрицательным изотопным составом углерода). Для более точного учета источников углекислоты в водах, а также ее участия в процессах карбонат-силикатного выветривания требуется более детальное исследование окружающей водоемы флоры, массивов горных пород и прочих факторов, что не является на текущий момент главной целью исследования. Тем не менее из рис. 5, *б* видно, что с увеличением содержания DIC в водах в целом вклад изотопно-легкой углекислоты становится большим (значения $\delta^{13}C_{DIC}$ становятся более отрицательными). Наибольшее обогащение изотопно-легким углеродом характерно для подземных вод.

***Таблица 2.*** *Изотопный состав вод и DIC на территории с. Новобибиево*
***Table 2.*** *Isotope composition of water and DIC at the territory of Novobibeevo settlement*

| № пп/ no. pp | № на рис. 1, *б*/No. in Fig. 1, *b* | Дата отбора Sampling date | $\delta D_{VSMOW}$ | $\delta^{18}O_{VSMOW}$ | $\delta^{13}C_{VPDB}$ | ∑DIC, ммоль/дм$^3$ mmol/l | $HCO_3/SO_4$ |
|---|---|---|---|---|---|---|---|
| | | | ‰ | | | | |
| *Трещинно-жильные воды гранитоидов (группа I)/Fracture-vein waters in granitoids (group I)* | | | | | | | |
| 1 | 8 | 03.07.2019 | –129 | –17,3 | –12,4 | 8,0 | 43,49 |
| 2 | 6 | 12.11.2019 | –133 | –17,9 | –13,3 | 8,6 | 72,47 |
| 3 | 2 | 12.11.2019 | –127 | –17,2 | –13,6 | 7,6 | 342,07 |
| 4 | 10 | 12.11.2019 | –126 | –16,7 | –13,7 | 8,0 | 414,05 |
| 5 | 2 | 28.07.2020 | –126 | –17,0 | –13,6 | 7,5 | – |
| 6 | 8 | 28.07.2020 | –128 | –17,6 | –13,1 | 8,2 | 95,29 |
| 7 | 4 | 28.07.2020 | –127 | –17,5 | –13,8 | 6,3 | 40,78 |
| *Воды зоны региональной трещиноватости гранитоидов в условиях антропогенного влияния (группа II) Waters of the zone of regional fracturing of granitoids under anthropogenic impact (group II)* | | | | | | | |
| 8 | 12 | 03.07.2019 | –124 | –16,4 | –12,4 | 4,3 | 4,57 |
| 9 | 1 | 12.11.2019 | –124 | –16,8 | –13,0 | 7,9 | 114,89 |
| 10 | 5 | 28.07.2020 | –128 | –17,2 | –13,6 | 7,5 | 39,99 |
| 11 | 6 | 28.07.2020 | –133 | –17,8 | –13,7 | 7,8 | 26,61 |
| 12 | 7 | 28.07.2020 | –125 | –16,8 | –11,4 | 8,4 | 10,16 |
| 13 | 17 | 28.07.2020 | –122 | –16,6 | –12,8 | 3,4 | 4,44 |
| 14 | 16 | 28.07.2020 | –128 | –17,2 | –13,7 | 7,6 | 14,77 |
| 15 | 3 | 28.07.2020 | –125 | –17,1 | –13,7 | 7,4 | 28,16 |
| 16 | 9 | 28.07.2020 | –126 | –17,1 | –14,2 | 8,7 | 28,20 |
| 17 | 13 | 28.07.2020 | –123 | –17,0 | –12,6 | 7,1 | 4,10 |
| *Поверхностные воды в условиях техногенной нарушенности (группа III) Surface waters under the conditions of technogenic disturbance (group III)* | | | | | | | |
| 18 | 22 | 03.07.2019 | –123 | –16,6 | –12,6 | 4,4 | 20,77 |
| 19 | 18 | 03.07.2019 | –124 | –16,3 | –12,5 | 4,9 | 16,67 |
| 20 | 19 | 03.07.2019 | –117 | –15,3 | –10,0 | 4,7 | 9,10 |
| 21 | 20 | 03.07.2019 | –124 | –16,2 | –12,6 | 5,1 | 12,02 |
| 22 | 21 | 28.07.2020 | –122 | –16,5 | –12,0 | 5,4 | 11,73 |
| *Поверхностные воды реки Ояш (группа IV)/Surface waters of the Oyash river (group IV)* | | | | | | | |
| 23 | 24 | 03.07.2019 | –119 | –15,2 | –11,7 | 6,7 | 50,15 |
| 24 | 23 | 28.07.2020 | –113 | –14,6 | –11,7 | 6,5 | 76,43 |

## Выводы

Таким образом, можно сделать следующие выводы:

1. В гидрогеологическом разрезе Новобибеевского проявления радоновые воды приурочены к безнапорному водоносному горизонту верхнепалеозойских гранитов Обского массива. Интрузивные породы разбиты сетью трещин, образующих единую обводненную зону трещинных вод, водообильность которой крайне мала. Вскрытая мощность обводненных гранитоидов достигает 120 м. Высокоомные значения УЭС (1000–2000 Ом·м) указывают на низкую трещиноватость и обводненность пород. Низкие значения УЭС (20–100 Ом·м) свидетельствуют о наличии обводненной зоны трещиноватости в гранитоидах.
2. Анализ имеющихся данных позволил впервые выделить четыре геохимические совокупности вод: трещинно-жильные воды гранитоидов (группа I), воды зоны региональной трещиноватости гранитоидов в условиях антропогенного влияния (группа II), поверхностные воды в условиях техногенной нарушенности (группа III) и поверхностные воды реки Ояш (группа IV). Радоновые воды характеризуются преимущественно $HCO_3$ Mg-Ca и Cl-$SO_4$-$HCO_3$ Na-Ca составом. Величина общей минерализации составляет 509–818 мг/дм$^3$, а содержания кремния 6,43–13,30 мг/дм$^3$. Геохи-

мические параметры среды изменяются от восстановительной до окислительной обстановки с величинами Eh от –63,1 до +163,8 мВ, pH от 7,0 до 7,3 и $O_{2раств.}$ от 2,80 до 7,89 мг/дм$^3$. Концентрации радионуклидов варьируют (мг/дм$^3$): $^{238}U$ от $1{,}75\cdot10^{-3}$ до $1{,}25\cdot10^{-1}$ и $^{232}Th$ от $4{,}04\cdot10^{-7}$ до $4{,}14\cdot10^{-5}$. $^{232}Th/^{238}U$ отношение в радоновых водах изменяется в интервале от $2{,}63\cdot10^{-5}$ до $3{,}20\cdot10^{-3}$ при среднем $1{,}14\cdot10^{-3}$. Активность радона в водах варьирует от 70 до 429 Бк/дм$^3$.

3. С ростом общей минерализации в растворе концентрируются Li, Cr, Zn, Br, Sr и U, снижаются содержания B, V, As, Nb, Mo, Au. Коэффициенты концентрации свидетельствуют о накоплении в водах Br, I, Se, Te, Re и U. Очень сильной интенсивностью водной миграции обладают: I, Se, Br, Te, Re и U, сильной: B, Sr, Mo, средней: Li, Zn, Ba, Sb, Hg, Pd, As, P, Cu и слабой (инертной) Au, Cd, Sc, Rb, Cs, W, Co, Cr, Si, Ni, Sn, V, TI, Pb Ge, Fe, Bi, Be, Ga, Th, Al, Ti, Hf, Y, Zr, Nb.
4. По результатам изучения быстроизменяющихся параметров мощность зоны активной циркуляции подземных вод составляет около 20 м, глубже превалирует затрудненный водообмен с восстановительными условиями геохимической обстановки (Eh от –81,2 до –28,0 мВ; $O_{2раств.}$ от 1,83 до 4,14 мг/дм$^3$). Наблюдается инверсия гидрогеохимического разреза и снижение величины общей минерализации от 385– 18 мг/дм$^3$ на глубинах 7,5–20 м до 483–594 мг/дм$^3$ на глубинах 56–70 м. Это сопровождается снижением концентраций $SO_4$, Cl, $NO_3$, Ca, Na, Br, Li, B, Al, V, Cr, As, Se, Sr, I и закономерным ростом F, Sc, Mn, Ga, Rb, Zr, Ba.
5. Изотопный состав (δD от –139,4 до –112,5 ‰ и $\delta^{18}O$ от –18,9 до –14,4 ‰) и расположение точек на диаграмме $\delta D=f(\delta^{18}O)$ указывает на метеорное происхождение всех изученных вод. Ряд точек, отвечающих изотопному составу кислорода и водорода речных и карьерных вод в определенной степени отклоняется от GMWL, LMWL для г. Новосибирска, LMWL, построенной на собственных данных для метеорных осадков, собранных за 2020 г. в сторону утяжеления изотопного состава водорода и кислорода, что является следствием испарения вод с поверхностей указанных объектов. Полученные значения $\delta^{13}C_{DIC}$ варьируют в диапазоне от –14,2 до –10,0 ‰ при содержании DIC от 3,4 до 8,7 ммоль/дм$^3$. Концентрация DIC в водах превышает его естественную концентрацию в дождевой воде, что указывает на незначительный вклад растворенного атмосферного углекислого газа в формировании DIC. Основным источником водорастворенной углекислоты является почвенная углекислота смешанного состава.

*Исследование выполнено при финансовой поддержке проектов Министерства науки и высшего образования РФ №№ FWZZ-2022-0014 и FSWW-0022-2020, РФФИ и Правительства Новосибирской области в рамках грантов № 20-45-543004 и 20-45-543005.*

## СПИСОК ЛИТЕРАТУРЫ

1. Вернадский В.И. Труды по радиогеологии. – М.: Наука, 1997. – 319 с.
2. Distribution characteristics and influencing factors of uranium isotopes in saline lake waters in the northeast of Qaidam Basin / C. Zhao, P. Zhang, X. Li, Y. Ning, L. Tan, R.L. Edwards, X. Yao, H. Cheng // Minerals. – 2020. – V. 10 (1). – P. 74.
3. Fractionation of rare earth elements (REEs) and actinides (U and Th) originating from acid thermal water during artificial and natural neutralization processes of surface waters / Y. Ogawa, D. Ishiyama, N. Shikazono, K. Iwane, T. Hoshino, M. Kajiwara, N. Tsuchiya, B. Saini-Eiduka, S.A. Wood // Geochimica et Cosmochimica Acta. – 2019. – V. 249. – P. 247–262.
4. Faraj T., Ragab A., Alfy M.E. Geochemical and hydrogeological factors influencing high levels of radium contamination in groundwater in arid regions // Environmental Research. – 2020. – V. 184. – 109303
5. Geochemical controls on dispersion of U and Th in Quaternary deposits, stream water, and aquatic plants in an area with a granite pluton / C. Yu, T. Berger, H. Drake, Z. Song, P. Peltola, M.E.Åström // Science of the Total Environment. – 2019. – V. 663. – P. 16–28.
6. High resolution multi-annual riverine fluxes of organic carbon, nutrient and trace element from the largest European Arctic river, Severnaya Dvina / A.V. Chupakov, O.S. Pokrovsky, O.Y. Moreva, L.S. Shirokova, N.V. Neverova, A.A. Chupakova, E.I. Kotova, T.Y. Vorobyeva // Chemical Geology. – 2020. – V. 538 (13). – 119491.
7. Physico-chemical conditions controlling the radionuclides mobilisation in various granitic environments / A.M. El-Mezayen, E.M. Ibrahim, M.G. El-Feky, S.M. Omar, A.M. El-Shabasy, S.A. Taalab // International Journal of Environmental Analytical Chemistry. – 2020. – P. 1–17.
8. Radium isotopes to trace uranium redox anomalies in anoxic Groundwater / L. Krall, L. Auqué-Sanz, J. Garcia-Orellana, G. Trezzi, E.-L. Tullborg, J. Suksi, D. Porcelli, P. Andersson // Chemical Geology. – 2019. – V. 531. – 119296.
9. The aqueous chemistry of polonium (Po) in environmental and anthropogenic processes / R. Ram, J. Vaughan, B. Etschmann, J. Brugger // Journal of Hazardous Materials. – 2019. – V. 380. – 120725.
10. Артамонова С.Ю. Содержание урана и радия-226 в подземных рассолах сибирской платформы // Интерэкспо Гео-Сибирь. – 2019. – Т. 2. – № 3. – С. 225–231.
11. Distribution, contamination and source identification of heavy metals in bed sediments from the lower reaches of the Xiangjiang River in Hunan province, China / X. Fang, B. Peng, X. Wang, Z. Song, D. Zhou, Q. Wang, Z. Zhilian Qin, C. Changyin Tan // Science of the Total Environment. – 2019. – V. 689. – P. 557–570.
12. Some naturally occurring radionuclides (NORM) in a river affected by acid mining drainages / G. Manjón, J. Mantero, I. Vioque, J. Galván, I. Díaz-Francés, R. García-Tenorio // Chemosphere. – 2019. – V. 223. – P. 536–543.
13. Assessment of metal and metalloid contamination in the waters and stream sediments around the abandoned uranium mine area from Mortórios, central Portugal / A.M.R. Neiva, P.C.S. Carvalho, I.M.H.R. Antunes, M.T.D. Albuquerque, A.C.S. Santos, P.P. Cunha, S.B.A. Henriques // Journal of Geochemical Exploration. – 2019. – V. 202. – P. 35–48.
14. Characteristics and assessment of toxic metal contamination in surface water and sediments near a uranium mining area / L. Yi, B. Gao, H. Liu, Y. Zhang, C. Du, Y. Li // International Journal of Environmental Research and Public Health. – 2020. – V. 17. – P. 548.
15. Thorium and uranium distribution in a passive system for mine water treatment / M.I. Prudêncio, T. Valente, R. Marques, M.A.S. Braga, J. Pamplona // E3S Web of Conferences. – 2019. – V. 98. – 09023.
16. Wang Z., Qin H., X Liu. Health risk assessment of heavy metals in the soil-water-rice system around the Xiazhuang uranium mine, China // Environmental Science and Pollution Research. – 2019. – V. 26. – P. 5904–5912.
17. $^{238}U$ and $^{232}Th$ isotopes in groundwater of Jordan: geological influence, water chemistry, and health impact / A.H. Alomari,

M.A. Saleh, S. Hashim, A. Alsayaheen, I. Abdeldin, A. Abukashabeh // Radiation Physics and Chemistry. – 2020. – V. 170. – 108660.
18. Sources of U and Th in groundwater of the paleobeach aquifer at Cox's Bazar, Southeast Bangladesh / A.A. Seddique, Y. Kon, R. Anma, H. Masuda, P. Bhattacharya, Y. Yokoo, S.B. Basak, K. Shinoda // Groundwater for Sustainable Development. – 2020. – V. 10. – 100332.
19. Посохов Е.В., Толстихин Н.И. Минеральные воды (лечебные, промышленные, энергетические). – М.: Недра, 1977. – 240 с.
20. Гусев В.К., Вериго Е.К. Радоновые воды Колывань-Томской складчатой зоны, их использование и охрана // Изменение природных условий под влиянием деятельности человека. – Новосибирск: Наука, Сибирское отделение, 1984. – С. 99–107.
21. Вериго Е.К., Быкова В.В., Гусев В.К. Заельцовское месторождение радоновых вод (Новосибирское Приобье) // Новые данные по геологии и полезным ископаемым Западной Сибири. – 1979. – № 14. – С. 47–51.
22. Гидрогеология и гидрогеохимия месторождения радоновых вод «Каменское» (г. Новосибирск) / Д.А. Новиков, А.Ф. Сухорукова, Т.В. Корнеева, Р. Каменова-Тотцева, А.А. Максимова, А.С. Деркачев, Ф.Ф. Дульцев, А.В. Черных // Известия Томского политехнического университета. Инжиниринг георесурсов. – 2021. – Т. 332. – № 4. – С. 192–208.
23. Новиков Д.А., Сухорукова А.Ф., Корнеева Т.В. Гидрогеология и гидрогеохимия Заельцовско-Мочищенского проявления радоновых вод (юг Западной Сибири) // Геодинамика и тектонофизика. – 2018. – Т. 9. – № 4. – С. 1255–1274.
24. Novikov D.A., T Korneeva.V. Microelements in radon waters of the Zaelsovsky field (the southern part of West Siberia) // Journal of Physics: Conference Series. – 2019. – V. 1172. – № 012096.
25. Novikov D.A., Dultsev F.F., Chernykh A.V. Role of water-rock interactions in the formation of the composition of radon waters of the Zaeltsovsky field (the southern part of West Siberia) // Journal of Physics: Conference Series. – 2020. – V. 1451 (1). – № 012007.
26. Изотопно-геохимические особенности проявления слаборадоновых вод «Инские источники» (юг Западной Сибири) / Д.А. Новиков, Ю.Г. Копылова, Л.Г. Вакуленко, А.Ф. Сухорукова, А.Н. Пыряев, А.А. Максимова, Ф.Ф. Дульцев, А.В. Черных // Известия Томского политехнического университета. Инжиниринг георесурсов. – 2021. – Т. 332. – № 3. – С. 135–145.
27. Первые данные по изотопному составу пластовых вод разрабатываемых нефтяных месторождений Новосибирской области / Д.А. Новиков, А.Н. Пыряев, А.В. Черных, Ф.Ф. Дульцев, С.В. Рыжкова // Известия Томского политехнического университета. Инжиниринг георесурсов. – 2021. – Т. 332. – № 2. – С. 59–72.
28. Hydrogeological conditions and hydrogeochemistry of radon waters in the Zaeltsovsky–Mochishche zone of Novosibirsk, Russia / D.A. Novikov, F.F. Dultsev, R. Kamenova-Totzeva, T.V. Korneeva // Environmental Earth Sciences. – 2021. – V. 80. – № 6. – Article 216.
29. Monitoring of radionuclides in the natural waters of Novosibirsk, Russia / D.A. Novikov, F.F. Dultsev, A.F. Sukhorukova, A.A. Maksimova, A.V. Chernykh, A.S. Derkachyov // Groundwater for Sustainable Development. – 2021. – V. 15. – 100674.
30. A new radon prediction approach for an assessment of radiological potential in drinking water / L.M.O. Martins, A.J.S.C. Pereira, A. Sousa Oliveira, L.F. Sanches Fernandes, F.A.L. Pacheco // Science of The Total Environment. – 2020. – V. 712. – 136427.
31. Ullah F., Muhammad S., Ali W. Radon concentration and potential risks assessment through hot springs water consumption in the Gilgit and Chitral, Northern Pakistan // Chemosphere. – 2022. – V. 287. – 132323.
32. Duggal V., Sharma S., Mehra R. Risk assessment of radon in drinking water in Khetri Copper Belt of Rajasthan, India // Chemosphere. – 2020. – V. 239. – 124782.
33. Radium measurements in bottled natural mineral-, spring- and medicinal waters from Poland / I. Chmielewska, S. Chałupnik, M. Wysocka, A. Smoliński // Water Resources and Industry. – 2020. – V. 24. – 100133
34. The first large-scale mapping of radon concentration in soil gas and water in Romania / B. Burghele, A. Ţenter, A. Cucoş, T. Dicu, M. Moldovan, B. Papp, K. Szacsvai, T. Neda, L. Suciu, A. Lupulescu, C. Maloş, Ş. Florică, C. Baciu, C. Sainzae // Science of The Total Environment. – 2019. – V. 669. – P. 887–892.
35. Epstein S., Mayeda T. Variation of O 18 content of waters from natural sources // Geochimica et Cosmochimica Acta. – 1953. – V. 4 (5). – P. 213–224.
36. Nelson S.T. A simple, practical methodology for routine VSMOW/SLAP normalization of water samples analysed by continuous flow methods // Rapid Communications in Mass Spectrometry. – 2000. – V. 4. – P. 1044–1046.
37. Evans M.J., Derry L.A., France-Lanord C. Degassing of metamorphic carbon dioxide from the Nepal Himalaya // Geochemistry, Geophysics, Geosystems. – 2008. – V. 9 (4). – P. 1–18.
38. Seasonal deuterium excess variations of precipitation at Summit, Greenland, and their climatological significance / B.G. Kopec, X. Feng, E.S. Posmentier, et al. // Journal of Geophysical Research: Atmospheres. – 2019. – V. 124. – P. 72–91.
39. Григорьев Н.А. Распределение химических элементов в верхней части континентальной коры. – Екатеринбург: УрО РАН, 2009. – 383 с.
40. Объяснительная записка к Геологической карте СССР. Серия Кузбасская. Масштаб 1:200000. Лист N-44-VI / под ред. Д.В. Михайловский, В.А. Мартынов. – М.: Союзгеолфонд, 1979. – 90 с.
41. Перельман А.И. Геохимия ландшафта. изд. 2-е. – М.: Высшая школа, 1975. – 342 с.
42. Ферронский В.И., Поляков В.А. Изотопия гидросферы. – М.: Научный мир, 2009. – 632 с.
43. Hoefs J. Stable isotope geochemistry. 8th ed. – Berlin: Springer International Publ. AG, part of Springer Nature, 2018. – 460 p.
44. Васильчук Ю.К., Чижова Ю.Н. Высотный градиент распределения δ18O и δD в атмосферных осадках и в снежном покрове высокогорных районов // Криосфера Земли. – 2010. – Т. XIV – № 1. – С. 13–21.
45. Specifying recharge zones and mechanisms of the transitional geothermal field through hydrogen and oxygen isotope analyses with consideration of water-rock interaction / R.M. Shoedarto, Y. Tada, K. Kashiwaya, K. Koike, I. Iskandar // Geothermics. – 2020. – V. 86. – 101797.
46. Hydrochemical and isotopic characterization of groundwater in the Ghis-Nekor plain (northern Morocco) / D. Chafouq, A. El Mandour, M. Elgettafi, M. Himi, I. Chouikri, A. Casas // Journal of African Earth Sciences. – 2018. – V. 139. – P. 1–13.
47. Das A., Krishnaswami S., Bhattacharya S.K. Carbon isotope ratio of dissolved inorganic carbon (DIC) in rivers draining the Deccan Traps, India: sources of DIC and their magnitudes // Earth and Planetary Science Letters. – 2005. – V. 236. – P. 419–429.
48. Quantifying carbon isotope disequilibrium during in-cave evolution of drip water along discreet flow paths / P.J. Mickler, P. Carlson, J.L. Banner, D.O. Breecker, L. Stern, A. Guilfoyle // Geochimica et Cosmochimica Acta. – 2019. – V. 244. – P. 182–196.
49. Новые данные по изотопному составу ($\delta^{13}C$, $\delta D$, $\delta^{18}O$, $^{87}Rb/^{86}Sr$ и $^{87}Sr/^{86}Sr$) рассолов сибирской платформы / Д.А. Новиков, А.Н. Пыряев, А.В. Черных, Ф.Ф. Дульцев, А.В. Ильин, Е.О. Чертовских // Известия Томского политехнического университета. Инжиниринг георесурсов. – 2021. – Т. 332. – № 7. – С. 20–33.
50. Craig H. Isotopic variations in meteoric waters // Science. – 1961. – V. 133. – P. 1702–1703.
51. International Atomic Energy Agency. URL: https://www.iaea.org/resources/nucleus-information-resources (дата обращения 05.12.2021)
52. Первые изотопно-гидрогеохимические данные по природным водам юго-восточного склона кряжа Чекановского (Арктические районы Сибирской платформы) / Д.А. Новиков, А.А. Максимова, А.Н. Пыряев, П.А. Ян / Известия Томского политехнического университета. Инжиниринг георесурсов. – 2020. – Т. 331. – № 11. –С. 157–167.
53. Karim A., Veizer J. Weathering processes in the Indus River Basin: implications from carbon, sulfur, oxygen and strontium isotopes // Chemical Geology. – 2000. – V. 170. – P. 153–177.

*Поступила 08.12.2021 г.*

**Информация об авторах**

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

***Дульцев Ф.Ф.***, научный сотрудник лаборатории гидрогеологии осадочных бассейнов Сибири Института нефтегазовой геологии и геофизики им. А.А. Трофимука СО РАН.

***Максимова А.А.***, инженер лаборатории гидрогеологии осадочных бассейнов Сибири Института нефтегазовой геологии и геофизики им. А.А. Трофимука СО РАН; ассистент кафедры минералогии и геохимии Новосибирского национального исследовательского университета.

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

***Фаге А.Н.***, кандидат технических наук, научный сотрудник лаборатории электромагнитных полей Института нефтегазовой геологии и геофизики им. А.А. Трофимука СО РАН.

***Хващевская А.А.***, кандидат геолого-минералогических наук, доцент, заведующая проблемной научно-исследовательской лабораторией гидрогеохимии Инженерной школы природных ресурсов Национального исследовательского Томского политехнического университета, доцент отделения геологии Инженерной школы природных ресурсов Национального исследовательского Томского политехнического университета.

***Деркачев А.С.***, студент, Новосибирский национальный исследовательский государственный университет.

***Черных А.В.***, научный сотрудник лаборатории гидрогеологии осадочных бассейнов Сибири Института нефтегазовой геологии и геофизики им. А.А. Трофимука СО РАН.

UDC 551.464.3 (1-924.71)

# INITIAL RESULTS OF THE INTEGRATED ISOTOPE-HYDROGEOCHEMICAL STUDIES OF THE NOVOBIBEEVO OCCURRENCE OF RADON-RICH WATERS

**Dmitry A. Novikov**[1,2],
NovikovDA@ipgg.sbras.ru

**Fedor F. Dultsev**[1],
DultsevFF@ipgg.sbras.ru

**Anastasia A. Maksimova**[2,1],
rock.nastaya64@gmail.com

**Aleksandr N. Pyryaev**[3,2],
pyrayev@igm.nsc.ru

**Aleksey N. Fage**[1],
FaguetAN@ipgg.sbras.ru

**Albina A. Khvashchevskaya**[4],
unpc_voda@mail.ru

**Anton S. Derkachev**[2],
a.derkachev@g.nsu.ru

**Anatoliy V. Chernykh**[1],
ChernykhAV@ipgg.sbras.ru

[1] Trofimuk Institute of Petroleum Geology and Geophysics SB RAS,
3, Koptyug avenue, Novosibirsk, 630090, Russia.

[2] Novosibirsk State University,
1, Pirogov street, Novosibirsk, 630090, Russia.

[3] Institute of Geology and Mineralogy SB RAS,
3, Koptyug avenue, Novosibirsk, 630090, Russia

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

***The relevance*** *of the investigation is in obtaining the first isotope-geochemical data on natural waters and embedding rocks at the Novobibeevo occurrence of radon-rich waters.*

***Goal:*** *to study the features of the chemical composition of natural waters and water-bearing rocks and to obtain the first data on the activity of $^{222}Rn$ and on the isotope composition: δD, $\delta^{18}O$, $\delta^{13}C$.*

***Methods.*** *Laboratory investigation of chemical composition by means of tritrimetry, ion chromatography, mass spectrometry with inductively coupled plasma was carried out in Basic Research Laboratory of Hydrogeochemistry at the School of Earth Sciences and Engineering of the Tomsk Polytechnic University. Determination of a set of characteristics – δD, $\delta^{18}O$, $\delta^{13}C_{DIC}$ waters and dissolved inorganic carbon (DIC) – was carried out in the Shared Equipment Center at the Institute of Geology and Mineralogy SB RAS using an Isotope Ratio Mass Spectrometer Finnigan™ MAT 253, equipped with the attachments for sample preparation H/Device (to determined δD) and GasBench II (to determine $\delta^{18}O$ and $\delta^{13}C_{DIC}$). The concentration of $^{222}Rn$ in water samples was measured with the Alfarad Plyus complex at the Laboratory of Hydrogeology of the Sedimentary Basins of Siberia of the IPGG SB RAS. Geophysical studies were carried out using the electrical exploration equipment Skala-48 with 48 electrodes and a 5 m step between them, according to the Schlumberger electrical exploration scheme. Data separation into uniform geochemical entities was performed using the coefficients Ca/Na, Ca/Mg, Ca/Si, Mg/Si, Na/Si. To reveal the degrees of chemical element concentration in natural waters, we calculated the concentrating coefficients $Kk_i = \frac{m_x}{n_x}$, and water migration coefficients (according to A.I. Perelman) $Kx_1 = \frac{m_x \cdot 100}{a \cdot n_x}$.*

***Results.*** *Integrated isotope-geochemical studies of radon-rich waters of the Novobibeevo occurrence have been carried out. Radon-rich waters ($^{222}Rn$ activity up to 429 Bq/dm$^3$) are mainly characterized by $HCO_3$ Mg-Ca composition with total mineralization (TDS) from 385 to 818 mg/dm$^3$ and silicon content from 5,77 to 13,30 mg/dm$^3$. The geochemical parameters of the environment vary from the reductive to oxidative setting with Eh from –81,2 to +212,7 mV; pH from 6,6 to 7,5, and $O_{2dissolved}$ from 1,62 to 7,89 mg/dm$^3$. Goundwaters were divided into two geochemical groups: 1) fracture-vein waters of granitoids with the ratios Ca/Si 11,49; Mg/Si 248; Na/Si 1,25; Si/Na 0,87; Ca/Na 10,02; Ca/Mg 4,76; rNa/rCl 8,79, and $SO_4$/Cl 4,35, and 2) waters of the zone of regional fracturing of granitoids under anthropogenic influence, with the ratios Ca/Si 16,3; Mg/Si 2,21; Na/Si 2,21; Si/Na 0,62; Ca/Na 9,84; Ca/Mg 9,95; rNa/rCl 0,89 and $SO_4$/Cl 1,78. The composition of surface waters under the conditions of technogenic disturbance is $SO_4$-$HCO_3$ Na-Mg-Ca with TDS from 385 to 461 mg/dm$^3$ and silicon content from 5,02 to 9,60 mg/dm$^3$. The geochemical parameters of the environment correspond to the oxidative setting with Eh from +107,8 to +145,6 mV; pH from 7,8 to 8,6, and $O_{2dissolved}$ from 6,49 to 14,38 mg/dm$^3$. Radon activity in the waters does not exceed 39 Bq/dm$^3$. The surface waters of the Oyash river are characterized mainly by the $HCO_3$ Na-Mg-Ca composition with TDS from 407 to 466 mg/dm$^3$ and silicon content from 1,22 to 2,87 mg/dm$^3$. The geochemical parameters of the environment correspond to the oxidative setting with Eh varying from +120,1 to +150,0 mV; pH from 8,4 to 8,5, and $O_{2dissolved}$ from 7,45 to 9,53 mg/dm$^3$. Radon activity in the river water varies from 1 to 12 Bq/dm$^3$. With an increase in total mineralization, the elements that are concentrated in radon-rich waters are Li, Cr, Zn, Br, Sr and U, which is accompanied by a decrease in the concentrations of B, V, As, Nb, Mo and Au. In the spectrum of element distribution, the highest content (mg/dm$^3$) was consistently determined for Si up to 8,85, Mn up to 0,22, Fe up to 0,34, Sr up to 0,77, and Ba up to 0,13, because water-bearing rocks are represented by biotite granites, porphyry-like and olivine dolerites. The elements accumulated in waters to a higher extent are Br, I, Se, Te, Re and U. The stable isotope composition (δD values varying from –139,4 to –112,5 ‰ and $\delta^{18}O$ values varying from –18,9 to –14,4 ‰) of waters and position of experimental points on the (δD vs $\delta^{18}O$)-plot indicating the meteoric origin of all the studied waters. The obtained $\delta^{13}C_{DIC}$ values vary from –14,2 to –10,0 ‰, with DIC content from 3,4 to 8,7 mmol/L. The main source of DIC is soil carbon dioxide of the mixed composition.*

***Key words:***
*Radon waters, stable isotopes, radon, genesis of waters, granites, new radon water occurrence Novobibeevskoe, the Novosibirsk Region, West Siberia.*

*The research was financially supported by projects no. FWZZ-2022-0014 and FSWW-0022-2020 of the Ministry of Science and Education of the Russian Federation, the Russian Foundation for Basic Research and Government of the Novosibirsk region within the framework of grants no. 20-45-543004 and 20-45-5430.*

## REFERENCES

1. Vernadsky V.I. *Trudy po radiogeologii* [Works on radiogeology]. Moscow, Nauka Publ., 1997. 319 p.
2. Zhao C., Zhang P., Li X., Ning Y., Tan L., Edwards R.L., Yao X., Cheng H. Distribution characteristics and influencing factors of uranium isotopes in saline lake waters in the northeast of Qaidam Basin. *Minerals*, 2020, vol. 10 (1), pp. 74.
3. Ogawa Y., Ishiyama D., Shikazono N., Iwane K., Hoshino T., Kajiwara M., Tsuchiya N., Saini-Eiduka B., Wood S.A. Fractionation of rare earth elements (REEs) and actinides (U and Th) originating from acid thermal water during artificial and natural neutralization processes of surface waters. *Geochimica et Cosmochimica Acta*, 2019, vol. 249, pp. 247–262.
4. Faraj T., Ragab A., Alfy M.E. Geochemical and hydrogeological factors influencing high levels of radium contamination in groundwater in arid regions. *Environmental Research*, 2020, vol. 184, 109303
5. Yu C., Berger T., Drake H., Song Z., Peltola P., Åström M.E. Geochemical controls on dispersion of U and Th in Quaternary deposits, stream water, and aquatic plants in an area with a granite pluton. *Science of the Total Environment*, 2019, vol. 663, pp. 16–28.
6. Chupakov A.V., Pokrovsky O.S., Moreva O.Y., Shirokova L.S., Neverova N.V., Chupakova A.A., Kotova E.I., Vorobyeva T.Y. High resolution multi-annual riverine fluxes of organic carbon, nutrient and trace element from the largest European Arctic river, Severnaya Dvina. *Chemical Geology*, 2020, vol. 538 (13), 119491.
7. El-Mezayen A.M., Ibrahim E.M., El-Feky M.G., Omar S.M., El-Shabasy A.M., Taalab S.A. Physico-chemical conditions controlling the radionuclides mobilisation in various granitic environments. *International Journal of Environmental Analytical Chemistry*, 2020, pp. 1–17.
8. Krall L., Auqué-Sanz L., Garcia-Orellana J., Trezzi G., Tullborg E.-L., Suksi J., Porcelli D., Andersson P. Radium isotopes to trace uranium redox anomalies in anoxic Groundwater. *Chemical Geology*, 2019, vol. 531, 119296
9. Ram R., Vaughan J., Etschmann B., Brugger J. The aqueous chemistry of polonium (Po) in environmental and anthropogenic processes. *Journal of Hazardous Materials*, 2019, vol. 380, 120725.
10. Artamonova S.Yu. Isotopes of uran and radium in underground Brines of Siberian plate. *Interexpo Geo-Siberia*, 2019, vol. 2, no. 3, pp. 225–231. In Rus.
11. Fang X., Peng B., Wang X., Song Z., Zhou D., Wang Q., Zhilian Qin Z., Changyin Tan C. Distribution, contamination and source identification of heavy metals in bed sediments from the lower reaches of the Xiangjiang River in Hunan province, China. *Science of the Total Environment*, 2019, vol. 689, pp. 557–570.
12. Manjón G., Mantero J., Vioque I., Galván J., Díaz-Francés I., García-Tenorio R. Some naturally occurring radionuclides (NORM) in a river affected by acid mining drainages. *Chemosphere*, 2019, vol. 223, pp. 536–543.
13. Neiva A.M.R., Carvalho P.C.S., Antunes I.M.H.R., Albuquerque M.T.D., Santos A.C.S., Cunha P.P., Henriques S.B.A. Assessment of metal and metalloid contamination in the waters and stream sediments around the abandoned uranium mine area from Mortórios, central Portugal. *Journal of Geochemical Exploration*, 2019, vol. 202, pp. 35–48.
14. Yi L., Gao B., Liu H., Zhang Y., Du C., Li Y. Characteristics and assessment of toxic metal contamination in surface water and sediments near a uranium mining area. *International Journal of Environmental Research and Public Health*, 2020, vol. 17, pp. 548.
15. Prudêncio M.I., Valente T., Marques R., Braga M.A.S., Pamplona J. Thorium and Uranium distribution in a passive system for mine water treatment. *E3S Web of Conferences*, 2019, vol. 98, 09023
16. Wang Z., Qin H., Liu X. Health risk assessment of heavy metals in the soil-water-rice system around the Xiazhuang uranium mine, China. *Environmental Science and Pollution Research*, 2019, vol. 26, pp. 5904–5912.
17. Alomari A.H., Saleh M.A., Hashim S., Alsayaheen A., Abdeldin I., Abukashabeh A. $^{238}$U and $^{232}$Th isotopes in groundwater of Jordan: geological influence, water chemistry, and health impact. *Radiation Physics and Chemistry*, 2020, vol. 170, 108660.
18. Seddique A.A., Kon Y., Anma R., Masuda H., Bhattacharya P., Yokoo Y., Basak S.B., Shinoda K. Sources of U and Th in groundwater of the paleobeach aquifer at Cox's Bazar, Southeast Bangladesh. *Groundwater for Sustainable Development*, 2020, vol. 10, 100332.
19. Posokhov E.V., Tolstikhin N.I. *Mineralnye vody (lechebnye, promyshlennye, energeticheskie)* [Mineral waters (healing, industrial, energy)]. Moscow, Nedra Publ., 1977. 240 p.
20. Gusev V.K., Verigo E.K. Radonovye vody Kolyvan-Tomskoy skladchatoy zony, ikh ispolzovanie [Radon waters of the Kolyvan-Tomsk fold zone, their use and protection]. *Izmenenie prirodnykh uslovy pod vliyaniem deyatelnosti cheloveka* [Change in natural conditions under the influence of human activity]. Novosibirsk, Nauka, Siberian branch, 1984. p. 99–107.
21. Verigo E.K., Bykova V.V., Gusev V.K. Zaeltsovskoe mestorozdenie radonovykh vod (Novosibirskoe Priobye) [Zaeltsovsky deposit of radon waters (Novosibirsk Priobye)]. *New data on geology and minerals of Western Siberia*, 1979, Iss. 14, pp. 47–51.
22. Novikov D.A., Sukhorukova A.F., Korneeva T.V., Kamenova-Totseva R., Maksimova A.A., Derkachev A.S., Dultsev F.F., Chernykh A.V. Hydrogeology and hydrogeochemistry of the «Kamenskoe» field of radon-rich waters (Novosibirsk). *Bulletin of the Tomsk Polytechnic University. Geo Assets Engineering*, 2021, vol. 332, no. 4, pp. 192–208. In Rus.
23. Novikov D.A., Sukhorukova A.F., Korneeva T.V. Hydrogeology and hydrogeochemistry of the Zaeltsovsko-Mochishchensky zone of radon waters in the southern West Siberia. *Geodynamics & Tectonophysics*, 2018, vol. 9, no. 4, pp. 1255–1274. In Rus.
24. Novikov D.A., Korneeva T.V. Microelements in radon waters of the Zaelsovsky field (the southern part of West Siberia). *Journal of Physics: Conference Series*, 2019, vol. 1172, 012096.
25. Novikov D.A., Dultsev F.F., Chernykh A.V. Role of water-rock interactions in the formation of the composition of radon waters of the Zaeltsovsky field (the southern part of West Siberia). *Journal of Physics: Conference Series*, 2020, vol. 1451 (1), no. 012007.
26. Novikov D.A., Kopylova Yu.G., Vakulenko L.G., Sukhorukova A.F., Pyryaev A.N., Maksimova A.A., Dultsev F.F., Chernykh A.V. Isotope geochemical features of occurrence of low-radon waters «Inskie springs» (south-western Siberia). *Bulletin of the Tomsk Polytechnic University. Geo Assets Engineering*, 2021, vol. 332, no. 3, pp. 135–145. In Rus.
27. Novikov D.A., Pyryaev A.N., Chernykh A.V., Dultsev F.F., Ryzhkova S.V. The first data on the isotopic composition of stratal waters of the developed oil fields in Novosibirsk region. *Bulletin of the Tomsk Polytechnic University. Geo Assets Engineering*, 2021, vol. 332, no. 2, pp. 59–72. In Rus.
28. Novikov D.A., Dultsev F.F., Kamenova-Totzeva R., Korneeva T.V. Hydrogeological conditions and hydrogeochemistry of radon waters in the Zaeltsovsky–Mochishche zone of Novosibirsk, Russia. *Environmental Earth Sciences*, 2021, vol. 80, no. 6, article 216.
29. Novikov D.A., Dultsev F.F., Sukhorukova A.F., Maksimova A.A., Chernykh A.V., Derkachyov A.S. Monitoring of radionuclides in the natural waters of Novosibirsk, Russia. *Groundwater for Sustainable Development*, 2021, vol. 15, 100674
30. Martins L.M.O., Pereira A.J.S.C., Sousa Oliveira A., Sanches Fernandes L.F., Pacheco F.A.L. A new radon prediction approach for

an assessment of radiological potential in drinking water. *Science of The Total Environment*, 2020, vol. 712, 136427
31. Ullah F., Muhammad S., Ali W. Radon concentration and potential risks assessment through hot springs water consumption in the Gilgit and Chitral, Northern Pakistan. *Chemosphere*, 2022, vol. 287, 132323
32. Duggal V., Sharma S., Mehra R. Risk assessment of radon in drinking water in Khetri Copper Belt of Rajasthan, India. *Chemosphere*, 2020, vol. 239, 124782
33. Chmielewska I., Chałupnik S., Wysocka M., Smoliński A. Radium measurements in bottled natural mineral-, spring- and medicinal waters from Poland. *Water Resources and Industry*, 2020, vol. 24, 100133
34. Burghele B., Ţenter A., Cucoş A., Dicu T., Moldovan M., Papp B., Szacsvai K., Neda T., Suciu L., Lupulescu A., Maloş C., Florică Ş., Baciu C., Sainzae C. The FIRST large-scale mapping of radon concentration in soil gas and water in Romania. *Science of The Total Environment*, 2019, vol. 669, pp. 887–892.
35. Epstein S., Mayeda T. Variation of O 18 content of waters from natural sources. *Geochimica et Cosmochimica Acta*, 1953, vol. 4 (5), pp. 213–224.
36. Nelson S.T. A simple, practical methodology for routine VSMOW/SLAP normalization of water samples analysed by continuous flow methods. *Rapid Communications in Mass Spectrometry*, 2000, vol. 4, pp. 1044–1046.
37. Evans M.J., Derry L.A., France-Lanord C. Degassing of metamorphic carbon dioxide from the Nepal Himalaya. *Geochemistry, Geophysics, Geosystems*, 2008, vol. 9 (4), pp. 1–18.
38. Kopec B.G., Feng X., Posmentier E.S. Seasonal deuterium excess variations of precipitation at Summit, Greenland, and their climatological significance. *Journal of Geophysical Research: Atmospheres*, 2019, vol. 124, pp. 72–91.
39. Grigoryev N. A. *Raspredelenie khimicheskikh elementov v verkhney chasti kontinentalnoy kory* [Distribution of chemical elements in the upper continental crust]. Yekaterinburg, Ural Branch of RAS Publ., 2009. 383 p.
40. Mikhaylovskiy D.V., Martynov V.A. *Obyasnitelnaya zapiska k Geologicheskoy karte SSSR. Seriya Kuzbasskaya. Masshtab 1:200000. List N-44-VI* [Explanatory note to the Geological map of the USSR. Kuzbass series. Scale 1:200000. Sheet N-44-VI]. Moscow, Soyuzgeolfond Publ., 1979. 90 p.
41. Perelman A.I. *Geokhimiya landshafta* [Landscape geochemistry]. Moscow, Vysshaya shkola Publ., 1975. 342 p.
42. Ferronsky V.I., Polyakov V.A. *Izotopiya gidrosfery* [Isotopy of the hydrosphere]. Moscow, Nauchny mir Publ., 2009. 632 p.
43. Hoefs J. *Stable isotope geochemistry*. 8th ed. Berlin, Springer International Publishing AG, part of Springer Nature, 2018. 460 p.
44. Vasilchuk Yu.K., Chizhova Yu.N. Altitudinal gradient of δ18O and δD in precipitation and snow cover in high mountains. *Earth's Cryosphere*, 2010, vol. XIV, no. 1, pp. 13–21. In Rus.
45. Shoedarto R.M., Tada Y., Kashiwaya K., Koike K., Iskandar I. Specifying recharge zones and mechanisms of the transitional geothermal field through hydrogen and oxygen isotope analyses with consideration of water-rock interaction. *Geothermics*, 2020, vol. 86, 101797.
46. Chafouq D., El Mandour A., Elgettafi M., Himi M., Chouikri I., Casas A. Hydrochemical and isotopic characterization of groundwater in the Ghis-Nekor plain (northern Morocco). *Journal of African Earth Sciences*, 2018, vol. 139, pp. 1–13.
47. Das A., Krishnaswami S., Bhattacharya S.K. Carbon isotope ratio of dissolved inorganic carbon (DIC) in rivers draining the Deccan Traps, India: Sources of DIC and their magnitudes. *Earth and Planetary Science Letters*, 2005, vol. 236, pp. 419–429.
48. Mickler P.J., Carlson P., Banner J.L., Breecker D.O., Stern L., Guilfoyle A. Quantifying carbon isotope disequilibrium during in-cave evolution of drip water along discreet flow paths. *Geochimica et Cosmochimica Acta*, 2019, vol. 244, pp. 182–196.
49. Novikov D.A., Pyryaev A.N., Chernykh A.V., Dultsev F.F., Ilyin A.V., Chertovskikh E.O. New data on the isotopic composition ($\delta^{13}C$, δD, $\delta^{18}O$, $^{87}Rb/^{86}Sr$ and $^{87}Sr/^{86}Sr$) of the Siberian platform brines. *Bulletin of the Tomsk Polytechnic University. Geo Assets Engineering*, 2021, vol. 332, no. 7, pp. 20–33. In Rus.
50. Craig H. Isotopic variations in meteoric waters. *Science*, 1961, vol. 133, pp. 1702–1703.
51. *International Atomic Energy Agency*. Available at: https://www.iaea.org/resources/nucleus-information-resources (accessed 05 December 2021)
52. Novikov D.A., Maksimova A.A., Pyryaev A.N., Yan P.A. First isotope-hydrogeochemical data on the natural waters of the southeast slope of the Chekanovsky ridge (Arctic areas of the Siberian platform). *Bulletin of the Tomsk Polytechnic University. Geo Assets Engineering*, 2020, vol. 331, no. 11, pp. 157–167. In Rus.
53. Karim A., Veizer J. Weathering processes in the Indus River Basin: implications from carbon, sulfur, oxygen and strontium isotopes. *Chemical Geology*, 2000, 170, pp. 153–177.

*Received: 8 December 2021.*

**Information about the authors**

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

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

***Anastasia A. Maksimova***, assistant, Novosibirsk State University; engineer, Trofimuk Institute of Petroleum Geology and Geophysics of Siberian Branch of Russian Academy of Sciences.

***Aleksandr N. Pyryaev***, Cand. Sc., researcher, Institute of Geology and Mineralogy of Siberian Branch of Russian Academy of Sciences; senior lecturer, Novosibirsk State University.

***Aleksey N. Fage***, Cand. Sc., researcher, Trofimuk Institute of Petroleum Geology and Geophysics of Siberian Branch of Russian Academy of Sciences.

***Albina A. Khvashchevskaya***, Cand. Sc., head of the scientific laboratory, National Research Tomsk Polytechnic University.

***Anton S. Derkachev***, student, Novosibirsk State University.

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

УДК 556.531.4:550.84.094

# ЭКСПЕРИМЕНТ ПО ОЦЕНКЕ САМООЧИЩЕНИЯ ОБСКОГО БОЛОТА (ЗАПАДНАЯ СИБИРЬ, ТОМСКАЯ ОБЛАСТЬ)

**Савичев Олег Геннадьевич**[1],
OSavichev@mail.ru

**Гусева Наталья Владимировна**[1],
guseva24@yandex.ru

**Хващевская Альбина Анатольевна**[1],
Garibova@yandex.ru

**Иванов Андрей Юрьевич**[1],
IvanovAYu@tpu.ru

**Ян Хэн**[1],
13698754927@163.com

**Чжоу Дань**[1],
929177582@qq.com

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

***Актуальность.*** *Равнинная территория Западной Сибири характеризуется очень высокой заболоченностью. Вследствие этого хозяйственная деятельность часто проводится на болотах и заболоченных землях, что определяет необходимость изучения самоочищения болотной среды для снижения негативного антропогенного воздействия на окружающую среду и оптимизации хозяйственной деятельности.*
***Цель:*** *экспериментальное изучение условий распространения в болотной среде загрязняющих веществ и самоочищения евтрофной болотной экосистемы.*
***Методы:*** *полевой эксперимент, методы определения химического состава болотных вод и водных вытяжек из торфов и минеральных отложений, статистические методы.*
***Результаты и выводы.*** *18 марта 2021 г. на Обском болоте (юг Томской области) в районе с. Нащеково пробурено 5 скважин, отобраны пробы болотных вод в деятельном горизонте торфяной залежи и торфов через 0,25 м. Четыре скважины расположены в виде вершин квадрата со стороной 100 м. В середине квадрата на поверхности болота 19.03.2021 г. выполнен выпуск 50 л раствора NaCl с концентрацией 20 г/дм$^3$. Повторные бурение и отбор проб болотных вод и торфов проведены 16.10.2021 г. Показано, что в течение этого периода непосредственно в месте выпуска раствора NaCl в интервале глубин 1,50–2,00 м сформировались относительно повышенные концентрации $Na^+$ (до 11,5 мг/дм$^3$) и $Cl^-$ (до 22,4 мг/дм$^3$). В прочих скважинах (на удалении около 70 м от выпуска) значимые изменения значений pH, удельной электропроводности EC, концентраций $Na^+$ и $Cl^-$ в болотных водах и водных вытяжках из торфов, связанные с выпуском раствора NaCl, не выявлены, что свидетельствует о высокой способности болотной экосистемы к самоочищению.*

***Ключевые слова:***
*Самоочищение, химический состав, торфяная залежь, болотные воды, Обское болото, Западная Сибирь.*

## Введение

Западно-Сибирский территориальный комплекс в целом и Томская область в его составе в частности характеризуются двумя основными чертами – функционированием мощного нефтегазодобывающего комплекса и очень высокой заболоченностью [1–5]. Сочетание этих особенностей, в свою очередь, приводит к сильнейшему взаимовлиянию хозяйственной деятельности и заболоченности – болота определяют специфику проектов и условий эксплуатации месторождений углеводородов и объектов инфраструктуры, а хозяйственная деятельность приводит к изменениям параметров болотных процессов (формирования и эволюции болотных экосистем), причем эти изменения во многих случаях не сводятся к прямолинейному уничтожению болот. Напротив, строительство дорог в ряде случаев сопровождается переобводнением прилегающих участков и усилением их заболачивания, а сброс (систематический или аварийный) сточных вод или рекультивация – не к деградации болота, а к изменению его водно-минерального питания, что иногда сопровождается формированием весьма устойчивых болотных экосистем евтрофного типа.

Указанные выше обстоятельства определяют актуальность изучения способности болот региона к самовосстановлению в целом и к их самоочищению от загрязняющих веществ, поступающих со сточными водами, в частности. С учетом этого в Томском политехническом университете (ТПУ) в течение многих лет выполняются исследования, в процессе которых рассмотрены условия использования болот в составе природно-техногенных систем очистки стоков, анализируются пространственно-временные изменения гидрологических и геохимических условий функционирования болот и возможные изменения состояния болот при разработке месторождений осадочных же-

лезных руд и сброса стоков на основе математического моделирования гидрогеохимических процессов. В том числе, с 2002 г. выполняются работы по изучению условий формирования химического состава болотных вод и торфов Обского болота, расположенного в левобережной части долины р. Оби (преимущественно на первой надпойменной террасе) на участке сел Нащеково (фоновый участок) и Мельниково (участок многолетнего сброса хозяйственно-бытовых сточных вод) в Томской области [6–8]. Ниже представлены результаты очередного этапа этих исследований, в рамках которого был проведен эксперимент по изучению условий распространения загрязняющих веществ в болотной среде и ее самоочищения в случае аварийного сброса сточных вод.

Основная цель рассматриваемого исследования – экспериментальное изучение условий распространения в болотной среде загрязняющих веществ (после выпуска на поверхность болота 50 л раствора NaCl с концентрацией 20 г/дм$^3$) и самоочищения евтрофной болотной экосистемы в результате смешения болотных, подземных и сточных вод. Задачи исследования: 1) уточнение химического состава болотных вод на фоновом и загрязненном участках; 2) сопоставление геохимических показателей болотных и подземных вод (потенциально и фактически гидравлически связанных); 3) проведение эксперимента по изменению химического состава болотных вод и водных вытяжек из торфов на участке 100×100 м в течение марта–октября 2021 г.

### Объект и методика исследования

Объект исследования – Обское евтрофное (низинное) болото общей длиной около 104 км, шириной 1,5–7,0 км и мощностью торфяной залежи в среднем около 3,2 м и максимумами до 5–6 м. Указанное болото расположено в левобережной части долины р. Оби, преимущественно на первой надпойменной террасе Оби. Торфа низинные, со степенью разложения 34 % и зольностью 28–29 % [6–10]. На границе первой надпойменной террасы в болото разгружаются подземные воды, в том числе напорные воды отложений палеогена и мела [11]. На участке у с. Мельниково в Обское болото [6, 7] в течение многих лет поступают хозяйственно-бытовые сточные воды.

18 марта 2021 г. на фоновом участке Обского болота у с. Нащеково было пробурено пять скважин (рис. 1), в которых отобраны пробы болотных вод из деятельного горизонта торфяной залежи, а затем – пробы торфа и минеральных отложений поинтервально (через 0,25 м) по всей глубине торфяной залежи до минерального грунта включительно. Четыре скважины (Н1: 56°30,905′ с.ш., 84°1,571′в.д.; Н2: 56°30,864′ с.ш., 84°1,504′в.д.; Н4: 56°30,822′ с.ш., 84°1,564′в.д.; Н5: 56°30,858′ с.ш., 84°1,630′в.д.) расположены в вершинах квадрата со стороной 100 м, а пятая (Н3: 56°30,861′ с.ш., 84°1,565′в.д.) – в его центре (рис. 1). После отбора проб воды и торфов 19 марта в 0,5 м от скважины Н3 на поверхность болота было вылито 50 л раствора NaCl (20 г/дм$^3$). 16 октября 2021 г. в этих же скважинах и в той же последовательности отобраны пробы болотной воды (из деятельного горизонта), торфа и минеральных отложений. Также 18.03.2021 г. и 16.10.2021 г. в трех километрах от скважин Н1–Н5 на Обском болоте в марте и октябре 2021 г. на окраине с. Нащеково были отобраны пробы подземной воды П (56°31,842′ с.ш., 84°4,013′в.д.), а 19.03.2021 г. в с. Мельниково вдоль дороги «Мельниково – Старая Шегарка» – две пробы болотных вод М1 (56°33,126′ с.ш., 84°6,384′в.д., в 0,70 км от суходола и 0,92 км от выпуска стоков по прямой) и М2 (56°33,179′ с.ш., 84°5,958′в.д., в 0,25 км от суходола и 0,62 км от выпуска стоков) на загрязненном участке Обского болота. Отбор проб торфов, болотных и подземных вод выполнен с учетом требований [12–15].

В пробах болотных, подземных и сточных вод в аккредитованной гидрогеохимической лаборатории Томского политехнического университета (ТПУ) определялись значения pH (потенциометрический метод), удельная электропроводность *EC* (кондуктометрический), бихроматная окисляемость *BO* (флуориметрический), перманганатная окисляемость *PO*, валовые содержания $Ca^{2+}$, $Mg^{2+}$, $HCO_3^-$, $Cl^-$, $CO_2$ (титриметрический), $SO_4^{2-}$ (турбидиметрический), $NH_4^+$, $NO_2^-$, $NO_3^-$ (фотометрический), $Na^+$, $K^+$ (пламенно-эмиссионная спектрометрия), Fe и более 30 микроэлементов (масс-спектрометрический с индуктивно-связанной плазмой МС-ИСП с использованием масс-спектрометра NexION 300D). В пробах Н2, Н3, М1, М2 (отобранных 19.03.2021 г.) также определены содержания органических микропримесей [7].

В водных вытяжках из предварительно высушенных проб торфов и минеральных грунтов определялись значения pH (потенциометрический метод) и *EC* (кондуктометрический), концентрации $Na^+$ (пламенно-эмиссионная спектрометрия) и $Cl^-$ (ионная хроматография). При этом пробоподготовка включала в себя доведение проб до воздушно-сухого состояния, растирание в фарфоровой ступке, перемешивание в круглодонной колбе в течение трех минут навески 50–100 г с добавлением деионизированной воды, центрифугирование в течение пяти минут. Более подробная информация о методиках пробоподготовки и методах анализа приведена в [7, 16].

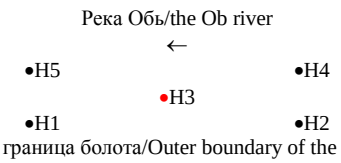



***Рис. 1.*** *Схема расположения скважин на Обском болоте у с. Нащеково в левобережной части долины р. Обь при проведении эксперимента; «←» – направление течения в р. Обь и снижения высотных отметок Обского болота*

***Fig. 1.*** *Boreholes layout on the Obskoe fen at Nashchekovo village in the left-bank part of the Ob river valley; «←» is a direction of current in the Ob river and reductions in high-altitude marks of the Obskoe fen*

Сравнение данных проводилось путем вычисления и анализа относительного изменения величины $\delta(X)$ для значений pH, *EC*, концентраций $Na^+$ и $Cl^-$ в каждом интервале глубин по уравнению (1), проверки с уровнем значимости 5 % на однородность по дисперсии и среднему (в водных вытяжках из торфов) с использованием критериев Фишера $K_F$ (2) и Стьюдента $K_S$ (3), соответственно [17], а также критерия $K_D$, связанного с критерием Нэша–Сатклифа $K_{NS}$ [18] отношением (4):

$$\delta(X) = 100\frac{X_{i,t_2} - X_{i,t_1}}{X_{i,t_1}}, \quad (1)$$

$$K_F = \frac{\max(D_1; D_2)}{\min(D_1; D_2)}, \quad (2)$$

$$K_S = \frac{|A_1 - A_2|}{\sqrt{N_1 D_1 + N_2 D_2}}\sqrt{\frac{N_1 N_2 (N_1 + N_2 - 2)}{N_1 + N_2}}, \quad (3)$$

$$K_D = \sqrt{1 - K_{NS}} = \sqrt{\frac{\sum\left(X_{i,t_2} - X_{i,t_1}\right)^2}{\sum\left(X_{i,t_1} - X_{a,t_1}\right)^2}}, \quad (4)$$

где $X_{i,t_1}$ и $X_{i,t_2}$ – значения показателя *X*, полученные в сроки $t_1$ (18.03.2021) и $t_2$ (16.10.2021) в скважине *i*; $A_1$, $A_2$, $D_1$, $D_2$ – средние арифметические значения и дисперсии для двух выборок водных вытяжек из торфов объемами $N_1$=$N_2$=$N$ (для болотных вод $N$=5, для торфов и минеральных отложений значение $N$ соответствует количеству интервалов опробования в каждой из скважин).

В процессе анализа полученных данных также проводился корреляционный и регрессионный анализ с учетом требований [17]. В общем случае связи между сравниваемыми показателями принимались статистически значимыми (с уровнем значимости 5 %) при условии, что коэффициенты корреляции *r* по модулю больше 0,70, квадрат корреляционного отношения $R^2$ более 0,36, коэффициенты корреляции и регрессии больше удвоенной погрешности их определения. Расчеты выполнены в MS Excel.

### Результаты исследования и их обсуждение

Болотные воды на фоновом участке у с. Нащеково 18 марта и 16 октября 2021 г. в целом характеризуются по классификации О.А. Алекина [19] как пресные с повышенной минерализацией, за исключением пробы, отобранной 18.03.2021 г. в скважине Н4. Болотные воды на загрязненном участке у с. Мельниково солоноватые, а подземные воды в с. Нащеково пресные с повышенной минерализацией с общим содержанием растворенных солей, близким к категории «солоноватые воды» (табл. 1). По химическому составу болотные воды гидрокарбонатные кальциевые, а подземные воды гидрокарбонатные натриевые. Болотные воды характеризуются очень высокими значениями бихроматной и перманганатной окисляемости – косвенных показателей содержания органических веществ, в составе которых на фоновом участке выявлены повышенные концентрации органических фосфатов. В болотных водах загрязненного участка зафиксирован заметно более высокий уровень содержания фталатов, сложных эфиров, жирных кислот, спиртов алифатических (табл. 2), что согласуется как с ранее полученными данными на Обском болоте [7], так и с материалами других авторов [20–22].

В болотных водах обнаружены и очень высокие валовые концентрации Fe, особенно в скважине Н2, расположенной ближе к внешней границе болота и выше по уклону от скважины Н3 (табл. 1, рис. 1). На этом участке отсутствовали какие-либо сбросы сточных вод или размещение отходов, которые могли бы быть причиной повышения концентрация железа 16 октября в сравнении с пробой, отобранной 18 марта того же года. Поэтому, с учетом [23–26], более вероятной причиной является повышение концентрации продуктов трансформации органического вещества и образования коллоидных и взвешенных соединений металлов с фосфатами и органическими кислотами с учетом пространственной неоднородности влажности и вещественного состава торфов вследствие пространственно-временных изменений разгрузки подземных вод и отклика болотной экосистемы на их поступление.

Это предположение косвенно подтверждается наличием регрессионной зависимости между валовыми содержаниями Fe и P (рис. 2). Причем повышенные значения *BO* и *PO* и продуктов разложения органического вещества (например, P) в общем случае не совпадают по времени и в пространстве (табл. 1), что свидетельствует о неравномерности соответствующих биогеохимических процессов как об одном из важных факторов формирования химического состава болотных вод и торфов.

В результате проведения эксперимента (выпуск 50 л раствора NaCl с концентрацией 20 г/дм$^3$ в скважине Н3) выявлено некоторое увеличение концентраций $Cl^-$ в болотных водах в деятельном горизонте непосредственно в месте выпуска, но заметное увеличение содержания $Na^+$ не зафиксировано. Относительное увеличение концентраций $Cl^-$ обнаружено также в скважине Н1 (рис. 3, табл. 1). Проверка выборок (из пяти проб в каждой) на однородность по среднему и дисперсии показала, что в октябре 2021 г., по сравнению с мартом того же года, произошло статистически значимое уменьшение удельной электропроводности (табл. 3), а также окисляемости и суммарного содержания растворенных солей. Последнее связано главным образом со снижением концентраций $HCO_3^-$, причем одновременно выявлено увеличение концентраций растворенного $CO_2$, что также свидетельствует о природном изменении биогеохимических процессов в болотной среде. Непосредственно по содержанию $Na^+$ и $Cl^-$ в болотных водах нарушения однородности не обнаружены (табл. 3).

Более существенные изменения (с марта по октябрь) отмечены для указанных выше элементов (а также величин *EC* и pH) в водных вытяжках из торфов в четырех скважинах из пяти (Н1, Н3, Н4, Н5; табл. 3). При этом следует отметить, что в скважине Н3, где проведен выпуск раствора NaCl, заметное увеличение $Na^+$ (153 %) и $Cl^-$(365 %) было зафикси-

ровано в интервале глубин 1,50–1,75 м, в меньшей степени – до 2,00 м (табл. 4). Но в этой же скважине наблюдалось и снижение концентраций $Na^+$ и $Cl^-$ в нижней части торфяной залежи.

***Таблица 1.*** *Физико-химические показатели и химический состав подземных (П) и болотных вод на фоновом (Н1–Н5) и загрязненном (М1, М2) участках Обского болота*

***Table 1.*** *Physical and chemical parameters and chemical composition of ground (П) and fen waters on background (Н1–Н5) and polluted (М1, М2) sites of the Obskoe fen*

| Показатель Indicator | Единицы измерения Units | Н1 | | Н2 | | Н3 | | Н4 | | Н5 | | П | | М1 | М2 |
|---|---|---|---|---|---|---|---|---|---|---|---|---|---|---|---|
| | | 18.03.21 | 16.10.21 | 18.03.21 | 16.10.21 | 18.03.21 | 16.10.21 | 18.03.21 | 16.10.21 | 18.03.21 | 16.10.21 | 18.03.21 | 16.10.21 | 19.03.21 | 19.03.21 |
| $h_p$ | м/m | 5,00 | | 5,75 | | 4,50 | | 4,75 | | 5,00 | | – | | 4,00 | 5,00 |
| $h_{pI}$ | то же the same | 0,15 | 0,00 | 0,10 | 0,00 | 0,25 | 0,00 | 0,25 | 0,00 | 0,12 | 0,00 | – | | 0,00 | 0,00 |
| *EC* | мкСм/см µS/cm | 508 | 458 | 654 | 520 | 647 | 491 | 1318 | 478 | 630 | 452 | 1204 | 892 | 1792 | 1914 |
| pH | ед. pH unit of pH | 7,57 | 7,24 | 7,48 | 6,84 | 7,1 | 7,17 | 7,54 | 7,21 | 7,31 | 7,43 | 7,5 | 7,08 | 7,82 | 7,57 |
| *BO* | мгО/дм$^3$ | 135,0 | 23,0 | 125,0 | 57,0 | 600,0 | 70,0 | 213,0 | 58,0 | 152,0 | 54,0 | 8,9 | 57,0 | 136,0 | 423,0 |
| *PO* | mgO/dm$^3$ | 47,6 | 5,8 | 39,2 | 9,3 | 69,6 | 7,8 | 40,8 | 2,0 | 42,8 | 6,2 | 1,5 | 2,3 | 44,1 | 58,7 |
| $CO_2$ | мг/дм$^3$ mg/dm$^3$ | 1,9 | 10,6 | 2,6 | 22,9 | 3,5 | 17,6 | 2,6 | 12,3 | 3,5 | 5,3 | 2,6 | 17,6 | 1,9 | 4,4 |
| $\Sigma_{mi}$ | то же the same | 461,1 | 496,4 | 591,1 | 553,7 | 660,4 | 549,0 | 1031,9 | 527,7 | 649,0 | 486,4 | 946,8 | 890,0 | 1253,4 | 1400,8 |
| $Ca^{2+}$ | –//– | 96,0 | 84,0 | 132,0 | 118,0 | 119,0 | 88,0 | 183,0 | 100,0 | 125,0 | 92,0 | 90,0 | 96,0 | 160,0 | 160,0 |
| $Mg^{2+}$ | –//– | 6,0 | 23,2 | 4,0 | 13,4 | 24,0 | 47,6 | 42,0 | 17,1 | 18,3 | 23,2 | 24,4 | 31,7 | 30,5 | 24,4 |
| $Na^+$ | –//– | 8,9 | 6,3 | 6,4 | 6,2 | 8,2 | 8,1 | 12,5 | 8,0 | 8,6 | 7,3 | 140,0 | 115,0 | 152,0 | 177,0 |
| $K^+$ | –//– | 1,8 | 1,3 | 1,0 | 2,8 | 3,0 | 2,0 | 5,0 | 4,8 | 0,9 | 0,5 | 3,0 | 2,2 | 14,2 | 14,9 |
| $HCO_3^-$ | –//– | 346 | 376 | 439 | 410 | 498 | 386 | 756 | 395 | 492 | 361 | 595 | 576 | 659 | 844 |
| $SO_4^{2-}$ | –//– | 1,4 | 4,2 | 3,3 | <1 | 2,6 | 0,7 | 14,4 | <1 | 3,2 | 1,4 | 2,4 | 3,6 | 8,7 | 13,5 |
| $Cl^-$ | –//– | 1,0 | 1,5 | 5,4 | 3,3 | 5,6 | 16,6 | 19,0 | 2,8 | 1,0 | 1,0 | 92,0 | 65,5 | 229,0 | 167,0 |
| $NO_3^-$ | –//– | 0,22 | 0,27 | 0,17 | 0,23 | 0,19 | 0,17 | 0,27 | 0,23 | 0,42 | 0,18 | 1,85 | 2,43 | 0,13 | 0,13 |
| $NO_2^-$ | –//– | <0,02 | <0,02 | <0,02 | <0,02 | <0,02 | <0,02 | <0,02 | <0,02 | <0,02 | <0,02 | <0,02 | <0,02 | <0,02 | <0,02 |
| $NH_4^+$ | –//– | 0,11 | 0,15 | 0,18 | 0,75 | 0,32 | 0,21 | 0,46 | 0,34 | 0,29 | 0,11 | 0,11 | 0,06 | 0,32 | 9,60 |
| P | –//– | 0,15 | 0,13 | 0,16 | 5,27 | 0,78 | 2,02 | 2,36 | 1,46 | 0,75 | 0,33 | 0,05 | 0,05 | 0,94 | 10,40 |
| Si | –//– | 6,8 | 6,1 | 7,9 | 8,2 | 9,9 | 6,7 | 19,0 | 5,5 | 9,6 | 5,1 | 13,2 | 14,4 | 16,5 | 15,0 |
| Fe | –//– | 1,81 | 1,53 | 3,79 | 46,69 | 10,98 | 10,38 | 8,98 | 19,79 | 8,52 | 4,65 | 0,07 | 0,08 | 11,30 | 15,80 |
| Li | мкг/дм$^3$ mkg/dm$^3$ | 3,77 | 4,95 | 4,97 | 8,15 | 5,11 | 5,98 | 6,94 | 6,33 | 4,37 | 6,08 | 3,76 | 4,57 | 9,26 | 6,37 |
| Al | то же the same | 3,5 | 6,2 | 11,3 | 363,5 | 19,4 | 9,0 | 0,9 | 50,3 | 2,5 | 1,8 | 0,1 | 0,7 | 428,0 | 41,1 |
| Ti | –//– | 1,03 | 1,13 | 1,68 | 27,08 | 3,54 | 2,92 | 3,27 | 4,34 | 2,25 | 1,01 | 1,15 | 1,19 | 15,61 | 13,09 |
| V | –//– | 0,04 | 0,10 | 0,09 | 3,13 | 0,16 | 0,14 | 0,02 | 0,55 | 0,01 | 0,03 | 0,10 | 0,09 | 4,96 | 0,51 |
| Cr | –//– | 1,72 | 1,66 | 2,44 | 6,56 | 2,92 | 1,65 | 3,47 | 2,10 | 2,46 | 1,49 | 3,47 | 2,75 | 3,63 | 3,74 |
| Mn | –//– | 108 | 129 | 1345 | 3967 | 1607 | 174 | 1451 | 847 | 1358 | 166 | 7 | 3 | 983 | 1166 |
| Co | –//– | 0,135 | 0,162 | 0,737 | 2,334 | 0,814 | 0,181 | 0,441 | 0,398 | 0,555 | 0,103 | 0,109 | 0,087 | 1,947 | 0,616 |
| Ni | –//– | 0,17 | 0,106 | 0,93 | 4,127 | 0,27 | 0,370 | 0,21 | 0,635 | 0,17 | 0,106 | 0,03 | 0,025 | 2,74 | 2,03 |
| Cu | –//– | 0,11 | 0,257 | 2,21 | 5,350 | 0,17 | 0,318 | 0,31 | 1,270 | 0,07 | 0,067 | 0,18 | 0,304 | 4,86 | 3,54 |
| Zn | –//– | 1,73 | 3,542 | 10,19 | 74,036 | 5,11 | 5,433 | 4,39 | 19,809 | 1,13 | 1,352 | 3,20 | 2,622 | 16,26 | 16,90 |
| Y | –//– | 0,015 | 0,026 | 0,030 | 1,383 | 0,051 | 0,051 | 0,006 | 0,215 | 0,006 | 0,005 | 0,005 | 0,008 | 1,665 | 0,145 |
| Zr | –//– | 0,101 | 0,030 | 0,088 | 0,237 | 0,080 | 0,017 | 0,056 | 0,037 | 0,097 | 0,010 | 0,048 | 0,025 | 0,309 | 0,105 |
| Ba | –//– | 74,52 | 102,41 | 114,27 | 917,39 | 159,19 | 405,54 | 195,20 | 417,96 | 135,92 | 126,28 | 416,68 | 389,73 | 231,06 | 331,94 |
| La | –//– | 0,0082 | 0,0261 | 0,0331 | 1,3995 | 0,0720 | 0,0416 | 0,0023 | 0,1885 | 0,0068 | 0,0003 | 0,0003 | 0,0003 | 1,7368 | 0,1814 |
| Ce | –//– | 0,0228 | 0,0477 | 0,0787 | 3,0219 | 0,1518 | 0,0753 | 0,0115 | 0,4300 | 0,0177 | 0,0003 | 0,0003 | 0,0058 | 3,8923 | 0,3576 |
| Sm | –//– | 0,0003 | 0,0211 | 0,0003 | 0,2873 | 0,0140 | 0,0429 | 0,0003 | 0,0257 | 0,0003 | 0,0093 | 0,0003 | 0,0003 | 0,4023 | 0,0457 |
| Eu | –//– | 0,0111 | 0,0062 | 0,0092 | 0,1084 | 0,0272 | 0,0268 | 0,0226 | 0,0402 | 0,0196 | 0,0122 | 0,0517 | 0,0389 | 0,1158 | 0,0579 |
| Dy | –//– | 0,0007 | 0,0003 | 0,0062 | 0,1983 | 0,0034 | 0,0065 | 0,0003 | 0,0367 | 0,0003 | 0,0003 | 0,0003 | 0,0003 | 0,3129 | 0,0251 |
| Yb | –//– | 0,0003 | 0,0003 | 0,0003 | 0,0703 | 0,0003 | 0,0003 | 0,0003 | 0,0039 | 0,0003 | 0,0003 | 0,0003 | 0,0003 | 0,1277 | 0,0018 |
| Bi | –//– | 0,002 | 0,002 | 0,002 | 0,012 | 0,002 | 0,002 | 0,002 | 0,010 | 0,002 | 0,002 | 0,006 | 0,002 | 0,002 | 0,002 |

*Примечание: $h_p$ – глубина торфяной залежи; $h_{pI}$ – толщина мерзлого слоя торфяной залежи; EC – удельная электропроводность; BO и PO – бихроматная и перманганатная окисляемость; $\Sigma_{mi}$ – сумма главных ионов ($Ca^{2+}$, $Mg^{2+}$, $Na^+$, $K^+$, $HCO_3^-$, $CO_3^{2-}$, $SO_4^{2-}$, $Cl^-$).*

*Note: $h_p$ is depth of a peat deposit; $h_{pI}$ is the thickness of a frozen layer of a peat deposit; EC is the specific electric conductivity; BO and PO are the bichromate and permanganate oxidizability; $\Sigma_{mi}$ is the sum of the main ions ($Ca^{2+}$, $Mg^{2+}$, $Na^+$, $K^+$, $HCO_3^-$, $CO_3^{2-}$, $SO_4^{2-}$, $Cl^-$).*

***Таблица 2.*** *Концентрации органических микропримесей в болотных водах по состоянию на 19.03.2021 г., мкг/дм$^3$*

***Table 2.*** *Concentration of organic substances in fen waters, 19.03.2021, mkg/dm$^3$*

| Показатель/Parameter | H2 | H3 | M1 | M2 |
|---|---|---|---|---|
| | 18.03.21 | | | |
| Фталаты/Phthalates | 1793 | 2319 | 4605 | 6155 |
| Алканы/Alkanes | 112 | 201 | 666 | 197 |
| Спирты алифатические/Aliphatic alcohols | 188 | 361 | 522 | 560 |
| Фенолы/Phenols | 16 | 337 | 303 | <1 |
| Сложные эфиры/Esters | 1036 | 1667 | 2579 | 2571 |
| Неидентифицированные вещества/Unidentified substances | 41 | 25 | 77 | 132 |
| Углеводороды, исключая алканы/Hydrocarbons excluding alkanes | 11 | 13 | 174 | 33 |
| Ароматические соединения/Aromatic compounds | 6 | 20 | 96 | <1 |
| Жирные кислоты/Fatty acids | 452 | 52 | 677 | 715 |
| Терпеноиды/Terpenoids | 356 | 354 | 437 | 634 |
| Стероиды/Steroids | 252 | 91 | 524 | 375 |
| Алкалоиды/Alkaloids | <1 | 10 | <1 | <1 |
| Органические фосфаты/Organic phosphates | 21 | 5450 | 40 | 120 |
| Соединение, содержащие серу/Compounds containing sulfur | 4 | <1 | <1 | <1 |
| Соединения, содержащие азот/Compounds containing nitrogen | 61 | <1 | <1 | 160 |
| Итого/Total | 4350 | 5450 | 10700 | 11650 |

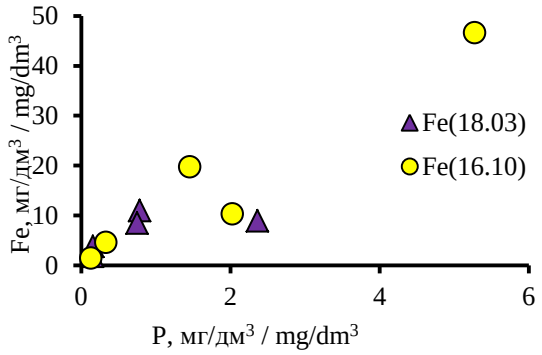



***Рис. 2.*** *Зависимость валовых концентраций Fe от содержания P в болотных водах в деятельном горизонте торфяной залежи: [Fe]=(8,177±0,836)·[P]; квадрат корреляционного отношения $R^2$=0,84*

***Fig. 2.*** *Dependence of Fe total concentration on P content in fen waters in active horizon of a peat deposit: [Fe]=(8,177±0,836)·[P]; a square of correlation relation $R^2$=0,84*

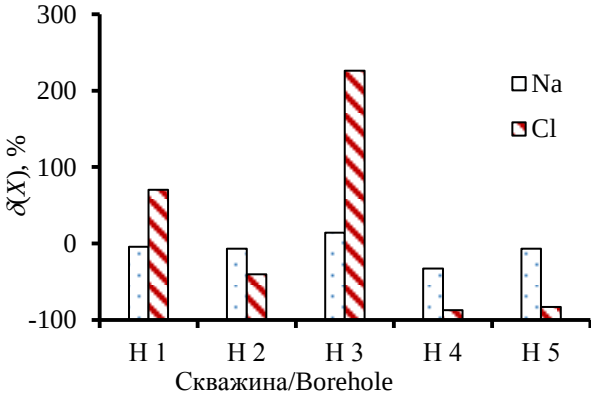



***Рис. 3.*** *Относительные изменения концентраций $Na^+$ и $Cl^-$ в болотных водах в деятельном горизонте торфяной залежи Обского болота за период с 18.03.2021 до 16.10.2021*

***Fig. 3.*** *Relative changes of $Na^+$ and $Cl^-$ concentration in fen waters in active horizon of peat deposit of the Obskoe fen from 18.03.2021 to 16.10.2021*

***Таблица 3.*** *Соотношение фактических (индекс «f») и критических значений (индекс «5 %» при уровне значимости 5 %) критериев Фишера $K_F$ (2) и Стьюдента $K_S$ (3) и значения критерия $K_D$ (4) для болотных вод и водных вытяжек из торфов Обского болота*

***Table 3.*** *Ratio of actual (index «f») and critical values («5 %» index at a significance value of 5 %) of Fisher's $K_F$ (2) and Student's $K_S$ (3) criteria and values of criterion $K_D$ (4) for fen waters and water extracts from peats of the Obskoe fen*

| Скважина Borehole | pH | | | *EC* | | | $Na^+$ | | | $Cl^-$ | | |
|---|---|---|---|---|---|---|---|---|---|---|---|---|
| | $K_{F(f)}/K_{F(5\,\%)}$ | $K_{S(f)}/K_{S(5\,\%)}$ | $K_D$ | $K_{F(f)}/K_{F(5\,\%)}$ | $K_{S(f)}/K_{S(5\,\%)}$ | $K_D$ | $K_{F(f)}/K_{F(5\,\%)}$ | $K_{S(f)}/K_{S(5\,\%)}$ | $K_D$ | $K_{F(f)}/K_{F(5\,\%)}$ | $K_{S(f)}/K_{S(5\,\%)}$ | $K_D$ |
| Сравнение выборок по пяти скважинам в марте и октябре/Comparison of the data on five boreholes in March and October | | | | | | | | | | | | |
| H1–H5 | 0,12 | 0,66 | 1,84 | **14,45** | 0,73 | 1,23 | 0,61 | 0,63 | 1,09 | 0,13 | 0,12 | 1,19 |
| Сравнение выборок по отдельным скважинам и в целом по пяти скважинам Comparison of the data on separate boreholes and as a whole on five boreholes | | | | | | | | | | | | |
| H1 | 0,46 | **1,60** | 1,40 | 0,91 | 0,96 | 0,81 | **3,34** | **1,07** | 2,97 | 0,41 | **2,67** | 2,02 |
| H2 | 0,73 | 0,80 | 11,49 | 0,57 | 0,46 | 1,52 | 0,47 | 0,33 | 1,30 | 0,68 | 0,79 | 1,56 |
| H3 | 0,95 | **1,79** | 1,80 | **2,02** | **1,02** | 0,93 | 0,62 | 0,57 | 1,12 | 0,71 | 0,35 | 1,30 |
| H4 | 0,44 | **1,43** | 10,60 | **3,14** | 0,82 | 0,93 | 0,70 | 0,52 | 0,97 | **2,38** | **1,08** | 0,82 |
| H5 | 0,91 | 0,16 | 1,44 | **1,22** | 0,81 | 1,00 | **1,16** | **1,53** | 1,03 | **2,02** | **1,43** | 1,05 |
| H1–H5 | **1,26** | 0,23 | 7,08 | **2,28** | **1,67** | 0,90 | **1,04** | 0,23 | 1,35 | **1,41** | **2,04** | 1,14 |

*Примечание: случаи нарушения однородности выделены полужирным шрифтом.*

*Note: cases of infringement of uniformity are bolded.*

***Таблица 4.*** *Значения pH, удельной электропроводности EC, концентрации $Na^+$ и $Cl^-$ в водных вытяжках из торфов и минеральных отложений Обского болота и их относительное изменение δ(X) (1) в течение 18.03.2021–16.10.2021*

***Table 4.*** *Values of pH, specific electric conductivity EC, $Na^+$ and $Cl^-$ concentration in water extracts from peats and mineral sediments of the Obskoe fen and their relative change δ(X) (1) from 18.03.2021 to 16.10.2021*

| Скважина/Borehole | Грунт Ground | Интервал глубин, м Interval of depths, m | pH, ед. pH units of pH | | δ(pH), % | EC, мкС/см µS/cm | | δ(EC), % | $Na^+$, мг/дм$^3$ mg/dm$^3$ | | δ($Na^+$), % | $Cl^-$, мг/дм$^3$ mg/dm$^3$ | | δ($Cl^-$), % |
|---|---|---|---|---|---|---|---|---|---|---|---|---|---|---|
| | | | 18.03.21 | 16.10.21 | | 18.03.21 | 16.10.21 | | 18.03.21 | 16.10.21 | | 18.03.21 | 16.10.21 | |
| H1 | т/р | 0,00–0,25 | 7,87 | 7,74 | –1,7 | 152 | 125 | –17,8 | 8,1 | 11,2 | 37,6 | 7,8 | 2,8 | –64,3 |
| | т/р | 0,25–0,50 | 7,67 | 7,50 | –2,2 | 102 | 113 | 11,0 | 7,6 | 7,6 | 0,1 | 8,4 | 2,1 | –74,6 |
| | т/р | 0,50–0,75 | 7,80 | 8,09 | 3,7 | 89 | 87 | –1,5 | 4,8 | 11,8 | 146,9 | 7,8 | 5,0 | –36,2 |
| | т/р | 0,75–1,00 | 7,81 | 7,85 | 0,5 | 89 | 72 | –19,0 | 3,8 | 2,9 | –23,2 | 6,5 | 1,1 | –82,8 |
| | т/р | 1,00–1,25 | 7,88 | 7,56 | –4,1 | 86 | 79 | –8,0 | 4,0 | 7,6 | 88,1 | 4,7 | 1,0 | –78,5 |
| | т/р | 1,25–1,50 | 7,80 | 7,58 | –2,8 | 91 | 83 | –9,1 | 4,0 | 4,9 | 22,4 | 5,2 | 1,1 | –78,3 |
| | т/р | 1,50–1,75 | 7,92 | 7,40 | –6,6 | 86 | 82 | –4,3 | 3,7 | 4,3 | 17,0 | 4,4 | 1,0 | –76,9 |
| | т/р | 1,75–2,00 | 8,28 | 7,60 | –8,2 | 84 | 90 | 6,5 | 5,2 | 3,5 | –33,5 | 6,5 | 1,5 | –77,5 |
| | т/р | 2,00–2,25 | 8,23 | 7,89 | –4,1 | 96 | 84 | –13,3 | 2,7 | 3,1 | 13,3 | 3,7 | 0,9 | –75,7 |
| | т/р | 2,25–2,50 | 8,32 | 7,88 | –5,3 | 88 | 86 | –2,6 | 2,5 | 2,8 | 14,2 | 3,7 | 0,3 | –90,9 |
| | т/р | 2,50–2,75 | 8,34 | 8,15 | –2,3 | 82 | 75 | –8,4 | 2,6 | 3,9 | 51,6 | 4,9 | 1,5 | –70,0 |
| | т/р | 2,75–3,00 | 8,34 | 8,04 | –3,6 | 78 | 74 | –5,5 | 2,5 | 4,5 | 82,5 | 3,3 | 1,1 | –65,5 |
| | т/р | 3,00–3,25 | 8,26 | 8,01 | –3,0 | 88 | 70 | –20,5 | 3,2 | 20,2 | 537,2 | 3,4 | 0,8 | –75,0 |
| | т/р | 3,25–3,50 | 8,28 | 8,02 | –3,1 | 89 | 69 | –22,8 | 2,5 | 3,8 | 55,7 | 3,1 | 1,0 | –67,2 |
| | т/р | 3,50–3,75 | 8,26 | 8,07 | –2,3 | 99 | 75 | –24,2 | 3,5 | 3,3 | –5,5 | 3,8 | 1,2 | –67,7 |
| | Т (б)/р (w) | 3,75–4,00 | 8,35 | 8,05 | –3,6 | 86 | 70 | –18,5 | 2,7 | 4,9 | 81,5 | 3,5 | 8,1 | 128,3 |
| | т/р | 4,00–4,25 | 8,41 | 7,96 | –5,4 | 85 | 76 | –10,7 | 1,8 | 4,9 | 180,0 | 2,4 | 1,0 | –57,0 |
| | т/р | 4,25–4,50 | 8,05 | 7,88 | –2,1 | 131 | 105 | –20,2 | 3,5 | 5,9 | 70,0 | 3,9 | 1,5 | –62,2 |
| | ут/wp | 4,50–4,75 | 8,01 | 7,91 | –1,3 | 157 | 110 | –30,2 | 8,7 | 16,2 | 85,6 | 5,2 | 1,3 | –74,4 |
| | ут/wp | 4,75–5,00 | 8,01 | 7,93 | –1,0 | 157 | 115 | –26,9 | 8,7 | 26,5 | 203,6 | 5,2 | 1,2 | –77,1 |
| | ОМО | 5,00–5,25 | 8,39 | 7,88 | –6,1 | 87 | 93 | 6,6 | 2,3 | 15,4 | 562,5 | 2,7 | 1,2 | –54,1 |
| | Суглинок Loam | 5,25–5,50 | 8,26 | 7,83 | –5,2 | 104 | 72 | –31,3 | 2,1 | 4,2 | 105,8 | 2,6 | 1,3 | –50,0 |
| H2 | т/р | 0,00–0,25 | 7,94 | 7,83 | –1,4 | 123 | 129 | 5,0 | 6,0 | 4,5 | –25,3 | 2,6 | 6,0 | 132,6 |
| | т/р | 0,25–0,50 | 7,99 | 8,04 | 0,6 | 184 | 83 | –54,9 | 7,1 | 4,5 | –36,0 | 10,1 | 1,6 | –84,5 |
| | т/р | 0,50–0,75 | 8,06 | 7,99 | –0,9 | 130 | 88 | –32,2 | 2,9 | 3,7 | 29,2 | 6,5 | 8,7 | 33,5 |
| | т/р | 0,75–1,00 | 8,18 | 7,96 | –2,7 | 109 | 71 | –35,1 | 1,8 | 3,0 | 65,4 | 2,4 | 1,5 | –37,9 |
| | т/р | 1,00–1,25 | 8,35 | 8,04 | –3,7 | 82 | 71 | –13,7 | 1,9 | 2,2 | 15,4 | 2,4 | 1,0 | –60,6 |
| | т/р | 1,25–1,50 | 8,40 | 7,98 | –5,0 | 79 | 63 | –20,1 | 2,1 | 2,6 | 23,0 | 4,1 | 0,7 | –82,4 |
| | т/р | 1,50–1,75 | 8,34 | 8,04 | –3,6 | 81 | 78 | –4,0 | 2,2 | 4,8 | 116,8 | 3,3 | 0,9 | –72,7 |
| | т/р | 1,75–2,00 | 8,32 | 7,93 | –4,7 | 81 | 73 | –9,8 | 1,5 | 2,8 | 81,6 | 2,0 | 1,0 | –51,5 |
| | т/р | 2,00–2,25 | 8,34 | 8,03 | –3,7 | 82 | 75 | –8,6 | 1,9 | 2,2 | 18,5 | 1,9 | 0,8 | –58,9 |
| | т/р | 2,25–2,50 | 8,33 | 7,94 | –4,7 | 77 | 74 | –4,0 | 1,7 | 2,3 | 37,5 | 1,7 | 0,9 | –46,4 |
| | т/р | 2,50–2,75 | 8,22 | 8,19 | –0,4 | 89 | 82 | –7,7 | 2,5 | 1,8 | –26,1 | 3,0 | 1,8 | –40,6 |
| | т/р | 2,75–3,00 | 8,18 | 8,43 | 3,1 | 101 | 90 | –10,6 | 1,5 | 1,4 | –9,9 | 2,7 | 2,7 | –1,8 |
| | т/р | 3,00–3,25 | 8,06 | 8,36 | 3,7 | 114 | 107 | –6,6 | 1,4 | 2,3 | 56,9 | 2,4 | 1,9 | –21,3 |
| | т/р | 3,25–3,50 | 8,08 | 8,16 | 1,0 | 109 | 140 | 28,5 | 4,0 | 2,1 | –46,3 | 4,1 | 2,4 | –43,2 |
| | т/р | 3,50–3,75 | 8,09 | 8,10 | 0,1 | 121 | 135 | 11,3 | 3,5 | 3,6 | 0,6 | 3,9 | 2,6 | –31,9 |
| | т/р | 3,75–4,00 | 8,18 | 8,53 | 4,3 | 110 | 83 | –24,5 | 2,1 | 2,7 | 31,3 | 3,4 | 8,3 | 148,2 |
| | ут/wp | 4,00–4,25 | 8,19 | 8,35 | 2,0 | 119 | 103 | –13,9 | 3,8 | 1,9 | –48,5 | 4,5 | 1,1 | –76,3 |
| | т/р | 4,25–4,50 | 8,19 | 8,34 | 1,8 | 119 | 104 | –12,9 | 3,8 | 1,7 | –56,0 | 4,5 | 1,1 | –75,0 |
| | т (ч)/р (b) | 4,50–4,75 | 8,03 | 7,98 | –0,6 | 140 | 147 | 4,6 | 2,2 | 1,5 | –33,9 | 3,0 | 4,3 | 42,4 |
| | ут/wp | 4,75–5,00 | 8,40 | 8,04 | –4,3 | 105 | 148 | 41,0 | 2,0 | 2,5 | 22,6 | 2,9 | 3,1 | 6,5 |
| | ут/wp | 5,00–5,25 | 8,40 | 8,09 | –3,7 | 105 | 150 | 42,6 | 2,0 | 3,5 | 72,6 | 2,9 | 1,9 | –34,7 |
| | ут/wp | 5,25–5,50 | 8,40 | 8,34 | –0,7 | 105 | 107 | 2,0 | 2,0 | 2,8 | 39,8 | 2,9 | 2,0 | –30,6 |
| | ут/wp | 5,50–5,75 | 8,40 | 8,44 | 0,5 | 105 | 103 | –2,4 | 2,0 | 8,3 | 314,9 | 2,9 | 1,3 | –54,0 |
| H3 | т/р | 0,00–0,25 | 8,00 | 7,85 | –1,9 | 300 | 175 | –41,7 | 8,3 | 9,3 | 12,5 | 10,5 | 8,1 | –22,9 |
| | т/р | 0,25–0,50 | 8,08 | 8,19 | 1,4 | 345 | 184 | –46,6 | 19,8 | 6,8 | –65,8 | 14,6 | 10,8 | –26,0 |
| | т/р | 0,50–0,75 | 8,02 | 8,26 | 3,0 | 216 | 131 | –39,2 | 8,4 | 3,6 | –57,4 | 6,3 | 3,1 | –49,9 |
| | т/р | 0,75–1,00 | 8,11 | 8,28 | 2,1 | 147 | 108 | –26,7 | 4,0 | 2,5 | –38,9 | 3,0 | 2,2 | –27,8 |
| | т/р | 1,00–1,25 | 8,12 | 8,34 | 2,7 | 148 | 109 | –26,6 | 4,4 | 3,4 | –23,3 | 2,9 | 3,2 | 11,5 |
| | т/р | 1,25–1,50 | 8,15 | 8,36 | 2,6 | 133 | 132 | –1,0 | 4,5 | 10,8 | 142,2 | 3,1 | 14,4 | 358,6 |
| | т/р | 1,50–1,75 | 8,30 | 8,26 | -0,5 | 107 | 176 | 64,2 | 4,6 | 11,5 | 152,7 | 4,8 | 22,4 | 364,7 |
| | т/р | 1,75–2,00 | 8,19 | 8,24 | 0,6 | 133 | 124 | –7,0 | 4,6 | 5,3 | 15,6 | 3,8 | 12,2 | 225,3 |
| | т/р | 2,00–2,25 | 8,13 | 8,26 | 1,6 | 141 | 117 | –17,2 | 5,5 | 4,1 | –26,5 | 6,9 | 6,6 | –4,9 |
| | т/р | 2,25–2,50 | 8,18 | 8,38 | 2,4 | 134 | 98 | –27,2 | 3,9 | 3,1 | –21,4 | 3,5 | 4,1 | 16,1 |
| | т/р | 2,50–2,75 | 8,15 | 8,29 | 1,7 | 136 | 115 | –15,4 | 4,0 | 5,9 | 47,6 | 2,9 | 5,4 | 85,6 |
| | т/р | 2,75–3,00 | 8,10 | 8,24 | 1,7 | 154 | 127 | –17,5 | 4,6 | 4,2 | –9,5 | 4,0 | 6,7 | 68,3 |

| Скважина/Borehole | Грунт Ground | Интервал глубин, м Interval of depths, m | pH, ед. pH units of pH | | δ(pH), % | EC, мкС/см µS/cm | | δ(EC), % | $Na^+$, мг/дм$^3$ mg/dm$^3$ | | δ($Na^+$), % | $Cl^-$, мг/дм$^3$ mg/dm$^3$ | | δ($Cl^-$), % |
|---|---|---|---|---|---|---|---|---|---|---|---|---|---|---|
| | | | 18.03.21 | 16.10.21 | | 18.03.21 | 16.10.21 | | 18.03.21 | 16.10.21 | | 18.03.21 | 16.10.21 | |
| | т/р | 3,00–3,25 | 8,19 | 8,26 | 0,9 | 129 | 122 | –5,3 | 5,0 | 3,7 | –25,1 | 3,0 | 4,6 | 54,9 |
| | т/р | 3,25–3,50 | 8,09 | 8,26 | 2,1 | 171 | 101 | –40,9 | 3,7 | 1,6 | –56,7 | 5,4 | 2,9 | –46,5 |
| | ут/wp | 3,50–3,75 | 8,23 | 8,30 | 0,9 | 119 | 124 | 4,4 | 8,3 | 4,9 | –41,0 | 22,8 | 2,7 | –88,2 |
| | ут/wp | 3,75–4,00 | 8,23 | 8,30 | 0,9 | 119 | 124 | 4,4 | 8,3 | 4,9 | –41,0 | 22,8 | 2,7 | –88,2 |
| | ут/wp | 4,00–4,25 | 8,23 | 8,42 | 2,3 | 119 | 92 | –22,9 | 8,3 | 1,5 | –82,3 | 22,8 | 2,5 | –89,2 |
| | т (ч)/р (b) | 4,25–4,50 | 8,10 | 8,42 | 4,0 | 134 | 92 | –31,6 | 3,0 | 1,5 | –50,8 | 2,5 | 2,5 | –2,4 |
| | ОМО/OMS | 4,50–4,75 | 8,16 | 8,41 | 3,1 | 129 | 81 | –36,9 | 2,7 | 2,1 | –21,5 | 2,4 | 1,1 | –53,5 |
| | Суглинок Loam | 4,75–5,00 | 8,40 | 8,41 | 0,1 | 83 | 81 | –2,2 | 2,2 | 2,1 | –1,9 | 1,7 | 1,1 | –33,3 |
| Н4 | т/р | 0,00–0,25 | 7,73 | 7,90 | 2,2 | 388 | 185 | –52,4 | 7,4 | 8,0 | 8,5 | 24,6 | 10,8 | –56,1 |
| | т/р | 0,25–0,50 | 7,79 | 8,14 | 4,4 | 294 | 150 | –49,1 | 10,7 | 5,5 | –48,3 | 18,9 | 7,9 | –58,2 |
| | т/р | 0,50–0,75 | 7,89 | 8,37 | 6,1 | 240 | 115 | –52,3 | 10,1 | 3,1 | –69,6 | 13,0 | 5,0 | –61,5 |
| | т/р | 0,75–1,00 | 8,08 | 8,33 | 3,1 | 127 | 108 | –15,2 | 3,4 | 2,5 | –26,5 | 5,3 | 2,0 | –63,2 |
| | т/р | 1,00–1,25 | 8,18 | 8,26 | 1,0 | 128 | 115 | –10,5 | 1,9 | 2,8 | 49,7 | 2,7 | 3,3 | 18,6 |
| | т/р | 1,25–1,50 | 8,03 | 7,97 | -0,7 | 132 | 144 | 9,3 | 3,5 | 3,4 | –1,4 | 4,5 | 3,3 | –27,3 |
| | т/р | 1,50–1,75 | 8,03 | 8,13 | 1,2 | 139 | 146 | 5,3 | 3,7 | 5,0 | 34,9 | 3,6 | 3,5 | –4,7 |
| | т/р | 1,75–2,00 | 8,08 | 8,16 | 1,0 | 128 | 142 | 11,2 | 2,7 | 2,8 | 3,3 | 2,7 | 2,7 | 0,0 |
| | т/р | 2,00–2,25 | 8,02 | 8,21 | 2,4 | 143 | 122 | –14,6 | 3,8 | 5,3 | 40,5 | 5,4 | 2,6 | –52,0 |
| | т/р | 2,25–2,50 | 8,06 | 8,06 | 0,0 | 131 | 159 | 21,2 | 5,6 | 4,2 | –25,5 | 6,6 | 3,0 | –54,3 |
| | т/р | 2,50–2,75 | 8,04 | 8,25 | 2,6 | 121 | 131 | 7,9 | 4,6 | 2,5 | –45,1 | 5,0 | 2,9 | –42,3 |
| | т/р | 2,75–3,00 | 8,07 | 8,20 | 1,6 | 158 | 144 | –8,7 | 5,1 | 2,8 | –44,6 | 9,5 | 3,0 | –68,8 |
| | т/р | 3,00–3,25 | 8,22 | 8,27 | 0,6 | 117 | 114 | –2,9 | 4,0 | 2,8 | –30,6 | 3,0 | 1,5 | –50,0 |
| | т/р | 3,25–3,50 | 8,20 | 8,20 | 0,0 | 118 | 122 | 3,7 | 3,0 | 2,4 | –20,2 | 2,0 | 1,3 | –31,6 |
| | т/р | 3,50–3,75 | 8,25 | 8,28 | 0,4 | 113 | 119 | 5,6 | 3,8 | 2,2 | –42,3 | 5,0 | 1,3 | –74,4 |
| | т/р | 3,75–4,00 | 8,18 | 8,29 | 1,3 | 117 | 117 | –0,1 | 3,6 | 7,4 | 104,4 | 3,1 | 1,7 | –46,5 |
| | т (ч)/р (b) | 4,00–4,25 | 8,05 | 8,28 | 2,8 | 146 | 112 | –23,3 | 3,6 | 4,8 | 32,6 | 3,3 | 1,7 | –49,1 |
| | т/р | 4,25–4,50 | 7,92 | 8,26 | 4,3 | 167 | 107 | –35,8 | 3,7 | 2,2 | –41,6 | 3,6 | 1,7 | –53,1 |
| | т/р | 4,50–4,75 | 8,43 | 8,62 | 2,3 | 84 | 63 | –24,9 | 1,3 | 1,3 | –0,8 | 2,0 | 1,0 | –51,5 |
| Н5 | т/р | 0,00–0,25 | 7,89 | 7,85 | –0,5 | 280 | 164 | –41,4 | 18,8 | 8,9 | –52,7 | 21,0 | 7,4 | –64,8 |
| | т/р | 0,25–0,50 | 7,94 | 7,85 | –1,1 | 323 | 164 | –49,2 | 11,5 | 8,9 | –22,6 | 8,9 | 7,4 | –16,4 |
| | т/р | 0,50–0,75 | 8,13 | 8,16 | 0,4 | 139 | 147 | 5,7 | 6,7 | 5,3 | –21,1 | 3,7 | 4,7 | 27,0 |
| | т/р | 0,75–1,00 | 8,21 | 8,22 | 0,1 | 125 | 119 | –4,6 | 5,8 | 3,2 | –44,9 | 4,5 | 2,5 | –45,1 |
| | т/р | 1,00–1,25 | 8,23 | 8,25 | 0,2 | 120 | 119 | –1,0 | 5,7 | 2,8 | –50,0 | 5,7 | 2,0 | –64,3 |
| | т/р | 1,25–1,50 | 8,23 | 8,44 | 2,6 | 117 | 89 | –24,2 | 4,5 | 2,7 | –41,4 | 4,0 | 2,2 | –44,4 |
| | т/р | 1,50–1,75 | 8,16 | 8,36 | 2,5 | 128 | 89 | –30,8 | 5,0 | 2,6 | –47,5 | 3,1 | 2,0 | –35,7 |
| | т/р | 1,75–2,00 | 8,23 | 8,31 | 1,0 | 107 | 89 | –17,1 | 4,5 | 2,0 | –55,2 | 3,3 | 2,2 | –32,1 |
| | т/р | 2,00–2,25 | 8,23 | 8,29 | 0,7 | 120 | 103 | –14,1 | 4,0 | 2,8 | –29,2 | 3,2 | 1,5 | –54,2 |
| | т/р | 2,25–2,50 | 8,20 | 8,20 | 0,0 | 121 | 116 | –4,0 | 4,4 | 2,5 | –41,9 | 5,6 | 2,1 | –62,0 |
| | т/р | 2,50–2,75 | 8,14 | 8,25 | 1,4 | 139 | 120 | –13,5 | 4,5 | 3,2 | –29,3 | 3,6 | 2,2 | –39,1 |
| | т/р | 2,75–3,00 | 8,30 | 8,17 | –1,6 | 130 | 129 | –0,9 | 3,9 | 2,6 | –32,7 | 2,7 | 2,0 | –24,9 |
| | т/р | 3,00–3,25 | 8,17 | 8,16 | –0,1 | 143 | 120 | –16,1 | 4,9 | 2,8 | –43,3 | 4,1 | 1,8 | –56,8 |
| | т/р | 3,25–3,50 | 8,17 | 8,16 | –0,1 | 122 | 131 | 7,5 | 3,7 | 2,8 | –23,1 | 2,5 | 1,4 | –43,1 |
| | ут/wp | 3,50–3,75 | 8,14 | 8,19 | 0,6 | 128 | 126 | –2,0 | 8,2 | 2,3 | –72,2 | 9,7 | 1,1 | –88,4 |
| | т/р | 3,75–4,00 | 8,17 | 8,05 | –1,5 | 130 | 155 | 18,9 | 6,9 | 3,0 | –56,4 | 5,7 | 1,8 | –68,7 |
| | т/р | 4,00–4,25 | 8,15 | 8,05 | –1,2 | 134 | 155 | 15,4 | 4,0 | 3,0 | –26,0 | 3,3 | 1,8 | –45,8 |
| | т (ч)/р (b) | 4,25–4,50 | 8,03 | 8,03 | 0,0 | 170 | 165 | –3,1 | 5,7 | 2,8 | –50,1 | 5,0 | 1,8 | –64,5 |
| | т (ч)/р (b) | 4,50–4,75 | 8,13 | 8,07 | –0,7 | 146 | 149 | 1,8 | 5,4 | 2,3 | –56,6 | 4,7 | 1,8 | –61,9 |
| | т (ч)/р (b) | 4,75–5,00 | 8,11 | 8,16 | 0,6 | 142 | 46 | –67,8 | 7,0 | 1,1 | –84,4 | 6,3 | 1,1 | –83,1 |
| | ОМО/OMS | 5,00–5,25 | 8,06 | 8,56 | 6,2 | 132 | 54 | –59,3 | 3,7 | 0,8 | –78,0 | 3,5 | 1,1 | –68,3 |

*Примечание: EC – удельная электропроводимость; грунт: т – торф; т (б) – торф белого цвета; т (ч) – торф черного цвета; ут – переувлажненный торф; ОМО – органо-минеральные отложения.*

*Note: EC is the specific electric conductivity; ground: p is the peat; p (w) is the peat of white color; p (b) is the peat of black color; wp is the waterlogged peat; OMS is the organo-mineral sediments.*

Анализ ранее полученной информации и опубликованных материалов других авторов [10] позволяет сделать вывод о наличии линз пересыщенного водой торфа в разных частях Обского болота – как по территории, так и по глубине. Формирование линз, судя по минерализации болотных и подземных вод [27–31], связано с притоком напорных подземных вод из отложений палеогенового и, видимо, мелового возраста, а также грунтовых вод (из четвертичных отложений) и поверхностных вод с прилегающей к болоту территории. В зависимости от напора подземных вод, влагосодержания и фильтрационных свойств минеральных и торфяных грунтов эти воды перераспределяются в болотной среде, причем их влияние наиболее

устойчиво в течение года вблизи от внешней границы болота. По мере удаления от границы роль случайных факторов возрастает, что, вероятно, и приводит к большей изменчивости физико-химических и геохимических показателей в скважинах Н4 и Н5.

Таким образом, повышенные концентрации $Na^+$ и $Cl^-$ в интервале глубин 1,50–2,0 м (в основном в интервале 1,50–1,75 м) в скважине Н3 можно объяснить как накоплением раствора NaCl, выпущенного 19.03.21 г., так и смещением линзы переобводненного торфа ближе к поверхности болота. Для проверки этих гипотез в водных вытяжках из торфов были дополнительно определены концентрации $Ca^{2+}$ в предположении, что их изменение синхронно с $Na^+$ и $Cl^-$ может свидетельствовать, скорее, в пользу второй гипотезы. Это связано со следующим: 1) подземные воды палеогеновых отложений в этом районе по минерализации от пресных со средней и повышенной минерализацией до солоноватых, а по составу гидрокарбонатные кальциевые и гидрокарбонатные натриевые; 2) соотношение $Na^+$ и $Ca^{2+}$, безусловно, может варьировать по мере изменения минерализации и ряда других причин, но увеличение $Na^+$ и $Cl^-$ вследствие притока подземных вод, тем не менее, должно сопровождаться и заметным ростом содержаний $Ca^{2+}$. Однако сопоставление полученных материалов показало, что в скважине Н3 значимое увеличение концентраций $Ca^{2+}$ в интервале глубин 1,50–1,75 м не прослеживается (рис. 4). С учетом этого более вероятно накопление $Na^+$ и $Cl^-$ в результате инфильтрации раствора NaCl на глубину до 2,0 м, причем в течение 211 суток концентрация раствора NaCl уменьшилась от 20 г/дм$^3$ до содержаний $Na^+$ 11,5 мг/дм$^3$ и $Cl^-$ 22,4 мг/дм$^3$.

В водных вытяжках из торфов, отобранных в скважинах Н1, Н2, Н4, Н5 (вершинах квадрата с центром в скважине Н3), статистически значимые изменения значений pH, удельной электропроводности, концентраций $Na^+$ и $Cl^-$, явно связанные с выпуском раствора NaCl, а не с флуктуациями природных факторов, в целом не обнаружены (табл. 3, 4, рис. 5). Так, относительное увеличение концентраций $Na^+$ и $Cl^-$ отмечено в интервалах глубин 0,50–0,75 и 3,75–4,00 м в скважине Н1, расположенной ниже по уклону от скважины Н3 (рис. 1). Подобные тенденции характерны и для скважины Н2, расположенной выше по уклону от скважины Н3, ближе к внешней границе болота, но не выявлены для скважины Н5 (ниже по уклону от Н3 на удалении от внешней границы болота). Таким образом, влияние выпуска раствора NaCl ограничено участком с площадью существенно меньше 1 га и глубиной торфяной залежи до 2,0 м.

В работе [32] было сделано предположение, что олиготрофное болото в условиях таежной зоны в Западной Сибири способно «справиться» в течение 3–5 лет с загрязнением в виде разового поступления нефтепродуктов до 16–17 т. Полученные авторами результаты в целом подтверждают этот вывод. Причем с учетом ранее полученных данных о влиянии сбросов хозяйственно-бытовых стоков в с. Мельниково [6–8] можно утверждать, что евтрофные долинные болота обладают не меньшей, по сравнению с олиготрофными водораздельными болотами, способностью к самоочищению.

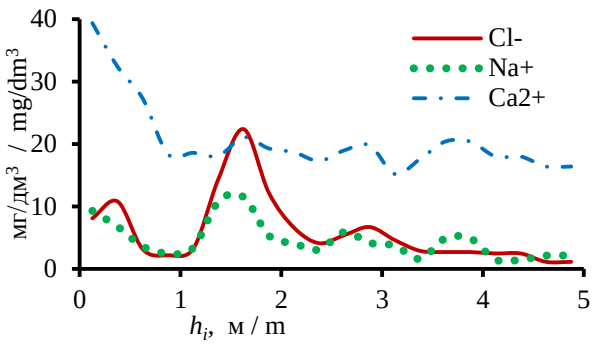



***Рис. 4.*** *Изменение концентраций $Ca^{2+}$, $Na^+$ и $Cl^-$ в водных вытяжках из торфов в скважине Н3 16 октября 2021 г.*

***Fig. 4.*** *Change of $Ca^{2+}$, $Na^+$ and $Cl^-$ concentration in water extracts from peats in borehole H3, 16.10.2021*

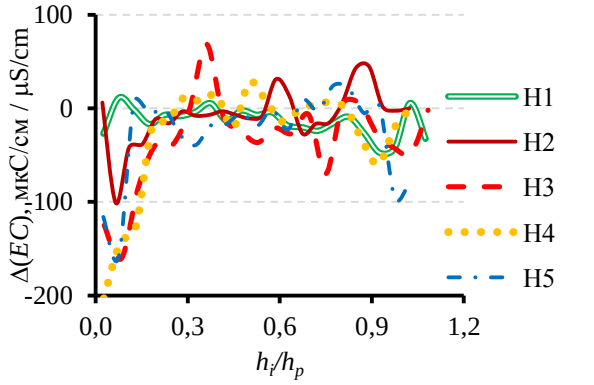



***Рис. 5.*** *Изменение удельной электропроводности водных вытяжек из торфов по скважинам Н1–Н5 с марта по октябрь 2021 ($\Delta(EC) = EC_{16.10.21} - EC_{18.03.21}$ ; $EC_{дата}$ – удельная электропроводность на дату отбора пробы воды и проведения измерения)*

***Fig. 5.*** *Change in specific electric conductivity of water extracts from peats on boreholes H1–H5 from March till October 2021 ($\Delta(EC) = EC_{16.10.21} - EC_{18.03.21}$ ; $EC_{дата}$ is the specific electric conductivity for date of sampling)*

Так, многолетний сброс хозяйственно-бытовых стоков в Обское болото у с. Мельниково (по крайней мере, с 1940-х гг.) привел к заметному увеличению значений ряда геохимических показателей болотных вод и торфов в верхней части торфяной залежи на участке, ограниченном в основном: вдоль р. Оби – створом около 400 м к северу от выпуска стоков; по поперечному профилю речной долины – створом примерно в 500–700 м от внешней границы болота. Разовое же поступление в это болото относительно небольшого количества растворенных солей, как показало рассматриваемое исследование, оказывает на эколого-геохимическое состояние евтрофной болотной экосистемы еще меньшее влияние (на границе достоверного выявления).

### Заключение

Выпуск 50 л раствора NaCl с концентрацией 20 г/дм$^3$ на поверхность евтрофного Обского болота 19 марта 2021 г. привел к формированию по состоянию на 16 октября 2021 г. непосредственно в этом месте (скважина Н3) относительно повышенных содержаний $Na^+$ и $Cl^-$ в деятельном горизонте торфяной залежи и в интервале глубин 1,50–2,00 (в основном в интервале 1,50–1,75 м). Скважина Н3 расположена в центре квадрата со сторонами 100 м. В вершинах этого квадрата (то есть на удалении от скважины Н3 около 70 м) статистически значимые изменения значений pH, удельной электропроводности *EC*, концентраций $Na^+$ и $Cl^-$ в болотных водах, явно связанные с выпуском раствора NaCl у скважины Н3, не выявлены.

Вместе с тем установлено заметное влияние на эколого-геохимическое состояние евтрофного Обского болота притока подземных вод. Это влияние наиболее ощутимо и устойчиво в течение всего 2021 г. по линии скважин Н1–Н2 на удалении 100 м от внешней границы Обского болота и наименее – по линии скважин Н4–Н5 на удалении 200 м от границы болота. Оно проявляется как непосредственно за счет поступления вод с минерализацией около 1 г/дм$^3$ и повышенного содержания $Fe^{2+}$, так и косвенно – путем изменения условий функционирования болотной экосистемы, следствием чего, вероятно, является неравномерное по территории и глубине распределение фильтрационных свойств и влагосодержания грунтов, концентраций химических элементов и соединений (например, содержания фосфатов и карбонатов, в свою очередь, оказывающих влияние на процессы растворения и осаждения).

В целом евтрофное Обское болото характеризуется высокой способностью к поддержанию устойчивого эколого-геохимического состояния. При этом необходимо отметить, что это состояние не соответствует установленным в Российской Федерации нормам качества природных вод уже на фоновых участках.

*Работа выполнена при финансовой поддержке гранта РФФИ БРИКС_Т № 18-55-80015.*

### СПИСОК ЛИТЕРАТУРЫ

1. Болотные системы Западной Сибири и их природоохранное значение / О.Л. Лисс, Л.И. Абрамова, Н.А. Аветов, Н.А. Березина, Л.И. Инишева, Т.В. Курнишкова, З.А. Слука, Т.Ю. Толпышева, Н.К. Шведчикова / под ред. В.Б. Куваева. – Тула: Гриф и К°, 2001. – 584 с.
2. Eurasian mires of the Southern Taiga Belt: modern features and response to Holocene palaeoclimate / T. Minayeva, W. Bleuten, A. Sirin, E.D. Lapshina // Wetlands and Natural Resource Management. Ecological Studies. V. 190 / Eds. J.T.A. Verhoeven, B. Beltman, R. Bobbink, D.F. Whigham. – Berlin: Heidelberg: Springer-Verlag, 2006. – P. 315–341.
3. Охрана окружающей среды в территориальном Западно-Сибирском комплексе / В.А. Шишов, В.Ю. Шеметов, В.И. Рябченко, В.П. Парфенов. – М.: ВНИИОЭНГ, 1988. – 50 с.
4. Ecosystem recovery and natural degradation of spilled crude oil in peat bog ecosystems of West Siberia / W. Bleuten, E. Lapshina, W. Ivens, V. Shinkarenko, E. Wiersma // International Peat Journal. – 1999. – № 9. – P. 73–82.
5. Global wetlands: potential distribution, wetland loss, and status / S. Hu, Zh. Niu, Y. Chen, L. Li, H. Zhang // Science of the Total Environment. – 2017. – V. 586. – P. 319–327. DOI: 10.1016/j.scitotenv.2017.02.001.
6. Химический состав вод Обского болота (Западная Сибирь) и его пространственные изменения под влиянием сбросов загрязняющих веществ / О.Г. Савичев, Н.В. Гусева, Е.А. Куприянов, А.А. Скороходова, К.В. Ахмед-Оглы // Известия Томского политехнического университета. – 2013 – Т. 323. – № 1. – С. 168–172.
7. Условия трансформации коммунально-бытовых сточных вод в болотных экосистемах (на примере Обского болота, Западная Сибирь) / И.С. Иванова, О.Г. Савичев, Е.А. Солдатова, Н.Г. Наливайко, Д.С. Корнеев, Н.В. Гусева, Н.А. Смирнова // Известия Томского политехнического университета. Инжиниринг георесурсов. – 2020. – Т. 331. – № 3. – С. 39–51. DOI: 10.18799/24131830/2020/3/2530.
8. Mineralogical and geochemical features of peat deposit of eutrophic the Obskoye fen in anthropogenous conditions (the Western Siberia) / O.G. Savichev, M.A. Rudmin, A.K. Mazurov, N.G. Nalivaiko, V.I. Sergienko, I.P. Semiletov // Doklady Earth Sciences. – 2020. – V. 492. – P. 1. – P. 320–322. DOI: 10.1134/S1028334X20050219.
9. Карта торфяных месторождений Западной Сибири. Масштаб 1:1000000: объяснительная записка / под ред. Р.Г. Матухина. – Новосибирск: Изд-во СО РАН: Филиал «Гео», 2000. – 33 с.
10. Vegetation characteristics and eco-hydrological processes in a pristine mire in the Ob River valley (Western Siberia) / A.M. Schipper, R. Zeefat, F. Tanneberger, J.P. van Zuidam, W. Hahne, S.A. Schep, S. Loos, W. Bleuten, H. Joosten, E.D. Lapshina, M.J. Wassen // Plant Ecology. – 2007. – V. 193. – P. 131–145. DOI: 10.1007/s11258-006-9253-x.
11. Савичев О.Г., Ян Хэнь. Гидрогеологические и гидрологические условия функционирования Обского и Баксинского болот (юго-восток Западно-Сибирской равнины) // Известия Томского политехнического университета. Инжиниринг георесурсов. – 2021 – Т. 332. – № 4. – С. 43–56. DOI: 10.18799/24131830/2021/04/3147.
12. ГОСТ 17644-83. Торф. Методы отбора проб из залежи и обработки их для лабораторных испытаний. – М.: Изд-во стандартов, 1983. – 12 с.
13. Требования к производству и результатам многоцелевого геохимического картирования масштаба 1:200 000 / отв. ред. Э.К. Буренков. – М.: ИМГРЭ, 2002. – 92 с.
14. Weight W.D. Hydrogeology field manual. 2nd ed. – USA: The McGraw-Hill Companies, Inc., 2008. – 751 p.
15. Manual on stream gauging. V. I. Fieldwork. WMO. № 1044. – Geneva, Switzerland: World Meteorological Organization, 2010. – 252 p.
16. Geochemical barriers in oligotrophic peat bog (Western Siberia) / O. Savichev, E. Soldatova, M. Rudmin, A. Mazurov // Applied Geochemistry. – 2020. – V. 113. – 104519. DOI: 10.1016/j.apgeochem.2019.104519.
17. Пособие по определению расчетных гидрологических характеристик / под ред. А.В. Рождественского, А.Г. Лобановой. – Л.: Гидрометеоиздат, 1984. – 448 с.
18. Nash J.E., Sutcliffe J.V. River flow forecasting through conceptual models. P. I – A discussion of principles // Journal of Hydrology. – 1970. – № 10 (3). – P. 282–290.
19. Алёкин О.А. Основы гидрохимии. – Л.: Гидрометеорологическое изд-во, 1970. – 444 с.
20. Guznyaeva M., Turov Yu. Features of the chemical composition impurities in natural waters of oil and gas producing territories // 19th International multidisciplinary scientific geoconference SGEM 2019. Conference proceedings. Science and technologies in geology, exploration and mining. – Albena, 30.06–06.07.2019. – Bulgaria, Sofia: СТЕФ92, 2019. – P. 185–192. DOI: 10.5593/sgem2019/3.1/S12.024.
21. Serebrennikova O.V., Selyanina S.B., Russkikh I.V., Strel'nikova E.B. Compositional features of fat-soluble organic compounds of the peat of the European north of Russia // AIP Conference Proceedings (American Institute of Physics Inc.). – 2020. – № 2310. – P. 020297. DOI: 10.1063/5.0034436.
22. Identification of hydrocarbons in the waters of raised bogs in the southern taiga of Western Siberia / I.V. Russkikh, E.B. Strel'nikova,

O.V. Serebrennikova, E.S. Voistinova, Y.A. Kharanzhevskaya // Geochemistry International. – 2020. – V. 58. – № 4. – P. 447–455. DOI: 10.1134/S0016702920040072.
23. Ephraim J.H., Allard B. Metal ion binding by humic substances // Modelling in Aquatic Chemistry / Eds. I. Grenthe, I. Puigdomenech. – Paris, France: OECD, Nuclear Energy Agency, 1997. – P. 207–244.
24. Solubility, mobility, and bioaccumulation of trace elements: abiotic processes in the rhizosphere / B. Robinson, N. Bolan, S. Mahimairaja, B. Clothier // Trace elements in the environment: biogeochemistry, biotechnology, and bioremediation / Ed. by M.N.V. Prasad, Ravi Naidu, Kenneth S. Sajwan. – New York, USA: Taylor & Francis Group, 2006. – P. 97–110.
25. Мотузова Н.В. Соединения микроэлементов в почвах. Системная организация, экологическое значение, мониторинг. – М.: ЛИБРОКОМ, 2013. – 168 с.
26. Iron adsorption onto soil and aquatic bacteria: XAS structural study / A.G. González, O.S. Pokrovsky, F. Jiménez-Villacorta, L.S. Shirokova, J.M. Santana-Casiano, M. González-Dávila, E.E. Emnova // Chemical Geology. – 2014. – № 372. – P. 32–45. DOI: 10.1016/j.chemgeo.2014.02.013.
27. Ермашова Н.А. Геохимия подземных вод зоны активного водобмена Томской области в связи с решением вопросов водоснабжения и охраны: автореф. дис. … канд. геол.-минерал. наук. – Томск, 1998. – 44 с.
28. Горохова И.В., Зятева О.Ф. Геохимия минеральных вод верхнемеловых отложений в с. Мельниково Томской области // Обской вестник. – 2001. – № 1. – С. 110–113.
29. Колоколова О.В. Геохимия подземных вод района Томского водозабора: автореф. дис. … канд. геол.-минерал. наук. – Томск, 2003. – 21 с.
30. Shvartsev S.L. Geochemistry of fresh groundwater in the main landscape zones of the Earth // Geochemistry International. – 2008. – V. 46. – № 13. – P. 1285–1398.
31. Состояние геологической среды (недр) на территории Сибирского федерального округа в 2018 г. Информационный бюллетень / под ред. В.А. Льготина. – Томск: Филиал «Сибирский региональный центр ГМСН», ФГБУ «Гидроспецгеология», 2019. – Вып. 15. – 218 с.
32. Савичев О.Г., Гусева Н.В. Методология управления геохимическим балансом водосборов на территории Западной Сибири // Известия Томского политехнического университета. Инжиниринг георесурсов. – 2020. – Т. 331. – № 5. – С. 28–45. DOI 10.18799/24131830/2020/5/2634.

*Поступила 11.12.2021 г.*

**Информация об авторах**

***Савичев О.Г.***, доктор географических наук, профессор отделения геологии Инженерной школы природных ресурсов Национального исследовательского Томского политехнического университета.

***Гусева Н.В.***, доктор геолого-минералогических наук, заместитель директора по научно-образовательной деятельности Инженерной школы природных ресурсов, заведующая кафедрой – руководитель отделения геологии на правах кафедры Инженерной школы природных ресурсов Национального исследовательского Томского политехнического университета.

***Хващевская А.А.***, кандидат геолого-минералогических наук, доцент Инженерной школы природных ресурсов Национального исследовательского Томского политехнического университета, заведующая проблемной научно-исследовательской лабораторией гидрогеохимии.

***Иванов А.Ю.***, кандидат геолого-минералогических наук, доцент Инженерной школы природных ресурсов Национального исследовательского Томского политехнического университета, директор обособленного подразделения «Центр учебных геологических практик».

***Ян Хэн***, аспирант отделения геологии Инженерной школы природных ресурсов Национального исследовательского Томского политехнического университета.

***Чжоу Дань,*** аспирант отделения геологии Инженерной школы природных ресурсов Национального исследовательского Томского политехнического университета.

UDC 556.531.4:550.84.094

# EXPERIMENT FOR ESTIMATING SELF-CLEANING OF THE OBSKOE FEN (WESTERN SIBERIA, TOMSK REGION)

**Oleg G. Savichev[1],**
OSavichev@mail.ru

**Natalya V. Guseva[1],**
guseva24@yandex.ru

**Albina A. Khvashchevskaya[1],**
Garibova@yandex.ru

**Andrey Yu. Ivanov[1],**
IvanovAYu@tpu.ru

**Yang Heng[1],**
13698754927@163.com

**Zhou Dan[1],**
929177582@qq.com

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

***Relevance.*** *The flat area of Western Siberia is very swampy. Therefore economic activities are frequently carried out on swamps and the swampy grounds that defines the necessity of researches of the swamp environment self-cleaning for reduction in negative anthropogenous influence on an environment and optimization of economic activities.*
***The aim*** *of the research is experimental studying of conditions of distribution in the swamp environment of polluting substances and self-cleaning of eutrophic fen.*
***Methods:*** *field experiment, methods of definition of a chemical composition of peat and water, statistical methods.*
***Results and conclusions.*** *Authors have drilled 5 boreholes and have selected samples of fen waters in active horizon of a peat deposit and peat through 0,25 m on the Obskoe fen (the south of Tomsk region) in area of settlement Nashchekovo on 18 March 2021. Four boreholes are located as tops of a square with the side 100 m. The dump of 50 litres of NaCl solution with concentration of 20 g/dm$^3$ is executed in the middle of a square on a fen surface on 19.03.2021. Repeated drilling and sampling of marsh waters and peats are carried out on 16 October 2021. It is shown that during this period directly in a place of release of NaCl solution in an interval of depths of 1,50–2,00 m relative increased concentration of $Na^+$ (up to 11,5 mg/dm$^3$) and $Cl^-$ (up to 22,4 mg/dm$^3$) were generated. In other boreholes (on distance about 70 m from release) significant changes of values of pH, specific electric conductivity EC, $Na^+$ and $Cl^-$ concentration in fen waters and water extracts from the peats, associated with release of NaCl solution, are not revealed. It testifies to high ability of fen ecological system to self-cleaning.*

***Key words***:
*Self-cleaning, chemical composition, peat deposit, fen waters, Obskoe fen, Western Siberia.*

*The research was financially supported by the RFBR grant no. 18-55-80015.*

## REFERENCES

1. Liss O.L., Abramova L.I., Avetov N.A. *Bolotnye sistemy Zapadnoy Sibiri i ikh prirodookhrannoe znachenie* [Bog of Western Siberia and their conservation value]. Tula, Grif i K° Publ., 2001. 584 p.
2. Minayeva T., Bleuten W., Sirin A., Lapshina E.D. Eurasian mires of the Southern Taiga Belt: modern features and response to Holocene palaeoclimate. *Wetlands and Natural Resource Management. Ecological Studies*. Vol. 190. Eds. J.T.A. Verhoeven, B. Beltman, R. Bobbink, D.F. Whigham. Berlin, Heidelberg, Springer-Verlag, 2006. pp. 315–341.
3. Shishov V.A., Shemetov V.Yu., Ryabchenko V.I., Parfenov V.P. *Okhrana okruzhayushchey sredy v territorialnom Zapadno-Sibirskom komplekse* [Environmental protection in the territorial West Siberian complex]. Moscow, VNIIOENG Publ., 1988. 50 p.
4. Bleuten W., Lapshina E., Ivens W., Shinkarenko V., Wiersma E. Ecosystem recovery and natural degradation of spilled crude oil in peat bog ecosystems of West Siberia. *International Peat Journal*, 1999, no. 9, pp. 73–82.
5. Hu S., Niu Zh., Chen Y., Li L., Zhang H. Global wetlands: potential distribution, wetland loss, and status. *Science of the Total Environment*, 2017, vol. 586, pp. 319–327. DOI: 10.1016/j.scitotenv.2017.02.001.
6. Savichev O.G., Guseva N.V., Kupriyanov E.A., Skorokhodova A.A., Akhmed-Ogly K.V. Chemical composition of the Ob Bog (West Siberia) and its spatial variations under the influence of the discharge of pollutants. *Bulletin of the Tomsk Polytechnic University*, 2013, vol. 323, no. 1, pp. 168–172. In Rus.
7. Ivanova I.S., Savichev O.G., Soldatova E.A., Nalivaiko N.G., Korneev D.S., Guseva N.V., Smirnova N.A. Conditions of transformation of municipal wastewater in bog ecosystems (on the example of Obskoe bog, Western Siberia). *Bulletin of the Tomsk Polytechnic University. Geo Assets Engineering*, 2020, vol. 331, no. 3, pp. 39–51. DOI: 10.18799/24131830/2020/3/2530.
8. Savichev O.G., Rudmin M.A., Mazurov A.K., Nalivaiko N.G., Sergienko V.I., Semiletov I.P. Mineralogical and geochemical features of peat deposit of eutrophic the Obskoye fen in anthropogenous conditions (the Western Siberia). *Doklady Earth Sciences*, 2020, vol. 492, P. 1, pp. 320–322. DOI: 10.1134/S1028334X20050219.

9. *Karta torfyanykh mestorozhdeniy Zapadnoy Sibiri. Masshtab 1:1000000: obyasnitelnaya zapiska* [Map of peat deposits in Western Siberia. Scale 1:1000000: explanatory note]. Ed. by R.G. Matukhin. Novosibirsk, SB RAS Publ. house, Branch «Geo», 2000. 33 p.
10. Schipper A.M., Zeefat R., Tanneberger F., Van Zuidam J.P., Hahne W., Schep S.A., Loos S., Bleuten W., Joosten H., Lapshina E.D., Wassen M.J. Vegetation characteristics and ecohydrological processes in a pristine mire in the Ob River valley (Western Siberia). *Plant Ecology*, 2007, vol. 193, pp. 131–145. DOI: 10.1007/s11258-006-9253-x.
11. Savichev O.G., Yang Heng. Hydro-geological and hydrological conditions of functioning of the Obskoe and Baksinskoe fens (the southeast of the Western Siberian plain. *Bulletin of the Tomsk Polytechnic University. Geo Assets Engineering*, 2021, vol. 332, no. 4, pp. 43–56. DOI: 10.18799/24131830/2021/04/3147.
12. GOST 17644-83. *Torf. Metody otbora prob iz zalezhi i obrabotki ikh dlya laboratornykh ispytany* [SS 17644-83 Peat. Methods of sampling from deposit and preparation of samples for laboratory tests]. Moscow, Izdatelstvo standartov, 1983. 12 p.
13. *Trebovaniya k proizvodstvu i rezultatam mnogotselevogo geokhimicheskogo kartirovaniya masshtaba 1:200000* [Requirements to production and results of multi-purpose geochemical mapping of scale 1:200000]. Ed. by E.K. Bkurenkov. Moscow, IMGRE, 2002. 92 p.
14. Weight W.D. *Hydrogeology field manual*. 2nd ed. USA, The McGraw-Hill Companies, Inc., 2008. 751 p.
15. *Manual on Stream Gauging*. Vol. I. *Fieldwork*. WMO. No. 1044. Geneva, Switzerland, World Meteorological Organization, 2010. 252 p.
16. Savichev O., Soldatova E., Rudmin M., Mazurov A. Geochemical barriers in oligotrophic peat bog (Western Siberia). *Applied Geochemistry*, 2020, vol. 113, 104519. DOI: 10.1016/j.apgeochem.2019.104519.
17. *Posobie po opredeleniyu raschetnykh gidrologicheskikh kharakteristik* [The manual by definition of hydrological characteristics]. Eds. A.V. Rozhdestvensky, A.G. Lobanova. Leningrad, Gidrometeoizdat Publ., 1984. 448 p.
18. Nash J.E., Sutcliffe J.V. River flow forecasting through conceptual models. P. I – A discussion of principles. *Journal of Hydrology*, 1970, no. 10 (3), pp. 282–290.
19. Alekin O.A. *Osnovy gidrokhimii* [Bases of hydrochemistry]. Leningrad, Gidrometeoizdat Publ., 1970. 444 p.
20. Guznyaeva M., Turov Yu. Features of the chemical composition impurities in natural waters of oil and gas producing territories. *19th International multidisciplinary scientific geoconference SGEM 2019. Conference proceedings. Science and technologies in geology, exploration and mining*. Albena, 30.06–06.07.2019. Bulgaria, Sofia, СТЕФ92, 2019. pp. 185–192. DOI: 10.5593/sgem2019/3.1/S12.024.
21. Serebrennikova O.V., Selyanina S.B., Russkikh I.V., Strel'nikova E.B. Compositional features of fat-soluble organic compounds of the peat of the European north of Russia. *AIP Conference Proceedings* (American Institute of Physics Inc.), 2020, no. 2310, pp. 020297. DOI: 10.1063/5.0034436.
22. Russkikh I.V., Strel'nikova E.B., Serebrennikova O.V., Voistinova E.S., Kharanzhevskaya Y.A. Identification of hydrocarbons in the waters of raised bogs in the southern taiga of Western Siberia. *Geochemistry International*, 2020, vol. 58, no. 4, pp. 447–455. DOI: 10.1134/S0016702920040072.
23. Ephraim J.H., Allard B. Metal ion binding by humic substances. *Modelling in Aquatic Chemistry*. Eds. I. Grenthe, I. Puigdomenech. Paris, France, OECD, Nuclear Energy Agency, 1997. pp. 207–244.
24. Robinson B., Bolan N., Mahimairaja S., Clothier B. Solubility, Mobility, and Bioaccumulation of Trace Elements: Abiotic Processes in the Rhizosphere. *Trace elements in the environment: biogeochemistry, biotechnology, and bioremediation*. Eds. M.N.V. Prasad, R. Naidu, K.S. Sajwan. New York, USA, Taylor & Francis Group, 2006. pp. 97–110.
25. Motuzova N.V. *Soedineniya mikroelementov v pochvakh. Sistemnaya organizatsiya, ekologicheskoe znachenie, monitoring* [Microelements in soils. System organization, ecological value, monitoring]. Moscow, LIBROCOM Publ., 2013. 168 p.
26. González A.G., Pokrovsky O.S., Jiménez-Villacorta F., Shirokova L.S., Santana-Casiano J.M., González-Dávila M., Emnova E.E. Iron adsorption onto soil and aquatic bacteria: XAS structural study. *Chemical Geology*, 2014, no. 372, pp. 32–45. DOI: 10.1016/j.chemgeo.2014.02.013.
27. Ermashova N.A. *Geokhimiya podzemnykh vod zony aktivnogo vodobmena Tomskoy oblasti v svyazi s resheniem voprosov vodosnabzheniya i okhrany*. Avtoreferat Dis. Kand. nauk [Geochemistry of groundwater in the active water exchange zone of the Tomsk region in relation to solution of water supply and protection issues. Cand. Diss. Abstract]. Tomsk, 1998. 44 p.
28. Gorokhova I.V., Zyateva O.F. Geokhimiya mineralnykh vod verkhnemelovykh otlozheniy v s. Melnikovo Tomskoy oblasti [Geochemistry of mineral waters of the Upper Cretaceous deposits in the village. Melnikovo of the Tomsk region]. *Obskoy vestnik*, 2001, no. 1, pp. 110–113.
29. Kolokolova O.V. *Geokhimiya podzemnykh vod rayona Tomskogo vodozabora*. Avtoreferat Dis. Kand. nauk [Geochemistry of groundwater in the Tomsk water intake area. Cand. Diss. Abstract]. Tomsk, 2003. 21 p.
30. Shvartsev S.L. Geochemistry of fresh groundwater in the main landscape zones of the Earth. *Geochemistry International*, 2008, vol. 46, no. 13, pp. 1285–1398.
31. *Sostoyanie geologicheskoy sredy (nedr) na territorii Sibirskogo federalnogo okruga v 2018 g. Informatsionny byulleten* [Condition of the geological environment (subsoil) in the territory of Siberian Federal District in 2018. Information bulletin]. Ed. by V.A. Lgotina. Tomsk, GMSN Siberian regional center branch, Gidrospetsgeologiya Publ., 2019. Iss. 15. 218 p.
32. Savichev O.G., Guseva N.V. Methodology of management of river basins geochemical balance in Western Siberia. *Bulletin of the Tomsk Polytechnic University. Geo Assets Engineering*, 2020, vol. 331, no. 5, pp. 28–45. DOI: 10.18799/24131830/2020/5/2634.


*Received: 11 December 2021.*

**Information about the authors**


***Oleg G. Savichev,*** Dr. Sc., professor, National Research Tomsk Polytechnic University.

***Natalya V. Guseva,*** Dr. Sc., professor, head of the department, National Research Tomsk Polytechnic University.

***Albina A. Khvashchevskaya,*** Cand. Sc., associate professor, head of the laboratory, National Research Tomsk Polytechnic University.

***Andrey Yu. Ivanov,*** Cand. Sc., associate professor, director of the detached division «Center educational geological practice», National Research Tomsk Polytechnic University.

***Yang Heng,*** postgraduate student, National Research Tomsk Polytechnic University.

***Zhou Dan,*** postgraduate student, National Research Tomsk Polytechnic University.

УДК 622.276

# ОБРАЗОВАНИЕ ТРЕЩИН ГИДРАВЛИЧЕСКОГО РАЗРЫВА ПЛАСТА В КАРБОНАТНЫХ СЛОЖНОПОСТРОЕННЫХ КОЛЛЕКТОРАХ С ЕСТЕСТВЕННОЙ ТРЕЩИНОВАТОСТЬЮ

**Мартюшев Дмитрий Александрович**[1],
martyushevd@inbox.ru

**Пономарева Инна Николаевна**[1],
permpolitech@gmail.com

**Филиппов Евгений Владимирович**[2],
evgenij.filippov@lp.lukoil.com

**Ли Ювэй**[3],
liyuweibox@126.com

[1] Пермский национальный исследовательский политехнический университет,
Россия, 614990, г. Пермь, пр. Комсомольский, 29.

[2] ООО «ЛУКОЙЛ-ПЕРМЬ»,
Россия, 614990, г. Пермь, ул. Ленина, 62.

[3] Университет Ляонин,
Китайская Народная Республика, 110036, Шэньян, район Хуангу, ул. Чуншань, 66.

***Актуальность*** *исследования обусловлена тем, что наличие естественной трещиноватости в карбонатных сложнопостроенных коллекторах является основным фактором, который влияет на форму и распространение сети трещин гидравлического разрыва пласта. В таких случаях, когда трещина гидравлического разрыва пласта сталкивается с естественной трещиноватостью, может иметь место различный характер их взаимодействия, например смещение, пересечение и т. п. Следовательно, проведение гидравлического разрыва пласта в сложнопостроенных карбонатных коллекторах, характеризующихся наличием естественной трещиноватости, может привести к образованию не симметричной трещины в ее классическом понимании, а их сложной сети. На основании полевых наблюдений (микросейсмический мониторинг и исследование пустотного пространства горных пород) установлена разная степень сложности трещин гидравлического разрыва пласта: от простой относительно плоской единичной трещины до достаточно сложной сети трещин.*

***Цель:*** *оценка образования сложных сетей трещин гидравлического разрыва пласта в карбонатных коллекторах с естественной трещиноватостью.*

***Объект:*** *сложнопостроенная карбонатная залежь с системой естественных трещин.*

***Методы:*** *анализ промысловых, технологических, гидродинамических данных и результатов микросейсмического мониторинга в процессе проведения гидравлического разрыва пласта.*

***Результаты.*** *Установлено, что проведение гидравлического разрыва в сложнопостроенных карбонатных коллекторах зачастую не приводит к образованию трещины в классическом ее понимании – два крыла, распространяющиеся симметрично от ствола скважины, что подтверждено результатами анализа графиков кривых восстановления давления в диагностических билогарифмических координатах. Трещины гидравлического разрыва пласта могут распространяться в пласт непосредственно от скважин – объектов воздействия (классическое представление), либо через существующую сеть естественных трещин, расположенных в зоне дренирования. Для вовлечения в процесс фильтрации значительного количества естественных трещин и других видов пустотности в процессе проведения гидравлического разрыва пласта жидкость разрыва целесообразно закачивать при низких скоростях. Контроль за развитием трещин гидроразрыва должен основываться на достоверной информации о естественной трещиноватости коллектора до проведения мероприятия, а регулирование – посредством мониторинга динамики давления и скорости закачки, что подтверждает результаты исследований.*

***Ключевые слова:***
*Скорость закачки, давление закачки, гидродинамические исследования скважин, пустотное пространство горных пород, раскрытость трещин, мониторинг гидравлического разрыва пласта, дебит нефти.*

## Введение

В нефтяной промышленности гидравлический разрыв пласта (ГРП) является одним из ведущих методов, позволяющих стабилизировать/увеличивать добычу углеводородного сырья при разработке нефтяных месторождений. На сегодняшний день вариации технологий ГРП разнообразны – от классического в вертикальных скважинах до многозонного (многостадийного) в горизонтальных скважинах, дренирующих нетрадиционные низкопроницаемые коллектора [1]. При разработке сланцевой нефти, сложнопостроенных горных пород-коллекторов ГРП обычно проводят для восстановления пустотного пространства коллектора. Главной задачей проведения ГРП является получение одиночных, множественных трещин или даже сетей трещин с достаточно высокими фильтрационными свойствами [2, 3]. Одним из механизмов, определяющих сложность образованной сети трещин ГРП, является взаимодействие между гидравлическими (искусственными) и естественными трещинами. В работах [4, 5] доказано,

что наличие естественной трещиноватости в горной породе является основным фактором, который влияет на форму и распространение сети трещин ГРП. В карбонатных сложнопостроенных коллекторах, характеризующиеся естественными трещинами, трещина ГРП может встретиться с пустотами различного масштаба, такими как разломы, плоскости напластования, сети естественных микротрещин/макротрещин и др. В таких случаях, когда трещина ГРП сталкивается с естественной трещиноватостью, может иметь место различный характер их взаимодействия, например смещение, пересечение и т. п. Следовательно, проведение ГРП в сложнопостроенных карбонатных коллекторах, характеризующихся наличием естественной трещиноватости, может привести к образованию не симметричной трещины в ее классическом понимании, а их сложной сети [6]. В том случае, если после ГРП в пласте образовалась трещина со строением, соответствующим классическому представлению, фильтрационный поток в пласте считается билинейным [7].

Анализ мирового опыта позволил выделить три типа характерного взаимодействия между трещиной ГРП и естественной трещиноватостью: 1) трещина ГРП может проникать в естественную трещину и тем самым увеличивать ее раскрытость; 2) трещина ГРП может сливаться с естественной трещиной; 3) трещина ГРП может раскрыть естественную трещиноватость, которая ранее в процессе эксплуатации деформировалась (сомкнулась).

Различные параметры, такие как напряженное состояние горных пород, технологические показатели проведения мероприятия (скорость закачки, вязкость жидкости разрыва и др.), а также геометрические, механические свойства и ориентация естественных трещин, могут в значительной мере оказывать влияние на взаимодействие естественных трещин с трещиной ГРП.

В настоящее время проведено значительное количество экспериментов по изучению взаимодействия естественных трещин с трещиной ГРП. В работах J. Zhou и др. [8, 9] приводится вывод, что разница напряжений, прочность на сдвиг естественных трещин и угол пересечения между естественными трещинами и трещиной ГРП являются превалирующими факторами, которые определяют распространения трещины ГРП в трещиноватом пласте. На основании лабораторных экспериментов L. Beugelsdijk и др. [10] установили, что при незначительных скоростях закачки и вязкости используемая жидкость имеет тенденцию фильтроваться по каналам естественных трещин, что приводит к образованию извилистых путей трещины ГРП. В работах C. Zou и др. [11] описана серия экспериментов по исследованию распространения трещин ГРП с использованием сканирующей компьютерной томографии. В результате установлено, что сложная сеть трещин ГРП образовывалась при небольшой разнице горизонтальных напряжений (менее 6 МПа), а обычная картина поперечного разрушения наблюдалась при значительной разнице горизонтальных напряжений (более 9 МПа). Кроме того, авторами отмечено, что преобладающая трещина ГРП в классическом понимании образовывается при высокой скорости закачки жидкости разрыва, тогда как сложная сеть трещин ГРП отмечается в основном при низкой скорости. В работе [12] авторами установлено, что образование нескольких ответвлений и сложность геометрии сети трещин гидроразрыва уменьшается при значительной разнице напряжений. При низкой скорости закачки и вязкости агента для ГРП жидкость имеет тенденцию фильтроваться в ранее существующие неоднородности и создавать извилистые траектории трещин, что соответствует выводам в работах [10, 11]. При высокой скорости закачки и вязкости агента для ГРП трещина имеет тенденцию пересекать множество трещинных сетей и является практически прямолинейной во всех направлениях. По мере снижения скорости закачки увеличивается количество естественных трещин, задействованных в процессе образования трещины ГРП, и отмечается два механизма зарождения трещин: 1) основные трещины ГРП образуются через существующие естественные трещины, расположенные вблизи ствола скважины; 2) основные трещины ГРП образуются через существующие естественные трещины, расположенные вдали от ствола скважины. На основании полевых наблюдений (микросейсмический мониторинг и исследований пустотного пространства горных пород) установлена разная степень сложности трещин ГРП: от простой относительно плоской единичной трещины до достаточно сложной сети трещин (рис. 1).

В своей работе M. Mayerhofer [13] отмечает концепцию определения стимулированного объема коллектора (трехмерное облако микросейсмических событий) для оценки эффективности мероприятия. Объем стимулированного коллектора может приблизительно соответствовать размеру созданной сложной сети трещин гидроразрыва. Но из-за невысокой точности измерительных устройств достаточно сложно выполнить анализ чувствительности или количественно оценить влияние различных факторов на взаимодействия между трещиной ГРП и несколькими блоками естественных трещин, а также суммарную сложную сеть трещин ГРП. Также статистика добычи на месторождениях показывает, что скважины, на которых проведен ГРП и в дальнейшем образована классическая трещина ГРП, могут достигать значительной начальной продуктивности с последующим быстрым ее снижением, что подтверждается данными исследований, представленными в работах [14–18].

Для исследования распространения трещин ГРП в естественно-трещиноватых пластах предложены комплексные численные модели, которые можно разделить на категории в соответствии с их численными методами: метод конечных элементов (FEM), включая расширенный метод конечных элементов (XFEM), метод граничных элементов (BEM), метод разрывных смещений (DDM), метод отдельных элементов (DEM) и метод решетки [19–21]. В большинстве вышеупомянутых методов исследования ствол скважины рассматривается как точка нагнетания или заранее заданная траектория разрыва, и влияние сети естественных трещин вблизи ствола скважины не принимается во внимание.

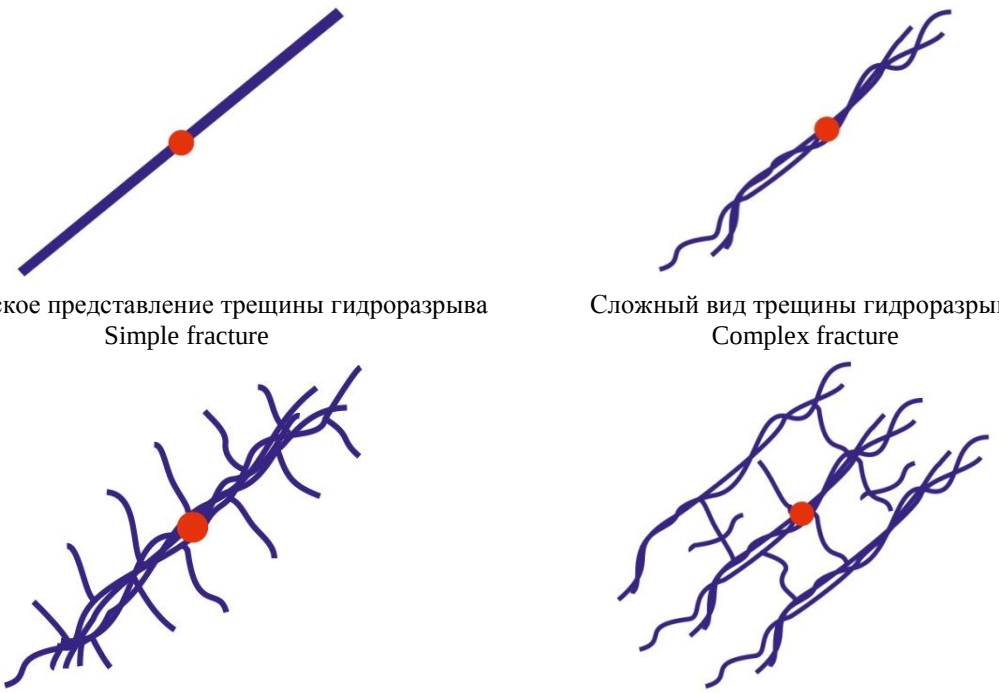



***Рис. 1.*** *Схемы уровней сложности образования трещин гидравлического разрыва пласта в сложнопостроенных карбонатных коллекторах с естественной трещиноватостью*

***Fig. 1.*** *Diagrams of the complexity levels of hydraulic fracturing in complex carbonate reservoirs with natural fracturing*

Таким образом, аналитический обзор мирового опыта проведения ГРП в карбонатных коллекторах с естественной трещиноватостью позволяет сделать вывод о превалирующем влиянии естественной трещиноватости коллектора и технологии самой операции на геометрию образующихся трещин разрыва [22–25].

Ниже приводятся результаты исследований по изучению геометрии трещин разрыва на примере одной скважины, эксплуатирующей сложнопостроенную карбонатную залежь с естественной трещиноватостью. Факт естественной трещиноватости подтвержден результатами изучения образцов керна, геофизических и гидродинамических исследований. В процессе эксплуатации на скважине проведено два кислотных гидроразрыва (2013 и 2018 гг.), характеризующихся разными скоростями закачки жидкости разрыва (рис. 2).

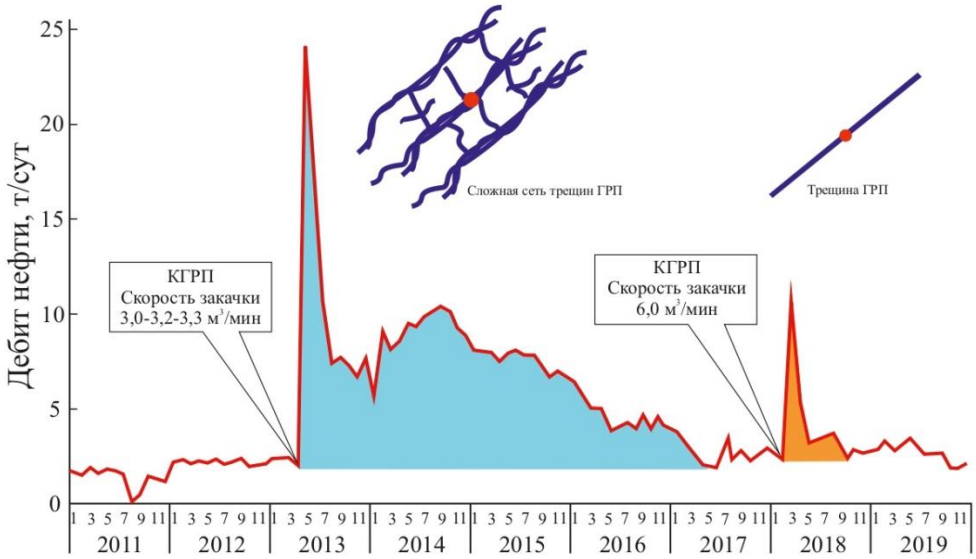



***Рис. 2.*** *Динамика показателей эксплуатации скважины в период проведения гидроразрывов*

***Fig. 2.*** *Dynamics of well operation indicators during hydraulic fracturing*

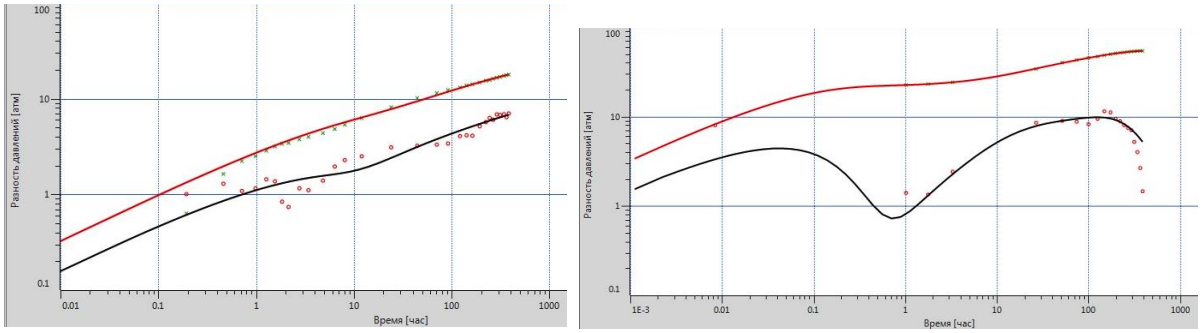
Кислотный гидроразрыв, проведенный в 2013 г., в процессе которого жидкость разрыва закачивалась в пласт со скоростью (расходом) 3–3,3 м$^3$/мин, способствовал резкому увеличению дебита нефти, который, несмотря на некоторое последующее снижение, продолжительное время превышал производительность скважины до ГРП. Кислотный гидроразрыв, проведенный в 2018 г., при проведении которого жидкость разрыва закачивалась с расходом 6 м$^3$/мин, также привел к значимому увеличению дебита, который практически сразу резко упал. При этом следует отметить, что обе операции проводились в схожих геолого-физических условиях по параметрам, являющимся критериями проведения ГРП. На период второго мероприятия остаточные запасы в зоне отбора оставались по-прежнему высокими.

Столь различающийся результат проведения ГРП в схожих условиях обусловил необходимость детального сравнительного анализа обоих мероприятий, в том числе с привлечением дополнительного промыслового материала. В период продолжающегося эффекта (непосредственно после ГРП) на скважине проведены гидродинамические исследования с использованием высокоинформативных технологий, что позволяет выполнить интерпретацию их материалов в современных программных продуктах и сопоставить геометрию фильтрационных потоков в зоне отбора скважины после первого и второго ГРП.

Для диагностики фильтрационных потоков и их геометрии до и после проведения каждого ГРП использован программный комплекс KAPPA Workstation (модуль Saphir), который позволяет при обработке кривых восстановления давления (КВД) качественно и количественно оценивать параметры естественной трещиноватости коллектора и трещин разрыва пород [26–28].

В ходе анализа построенных графиков установлено, что наличие трещины ГРП диагностируется только после проведения второго кислотного ГРП (рис. 3, *а*). Для исследования после первого гидроразрыва наилучшее совмещение модельной и фактической кривых восстановления давления и адекватные фильтрационные параметры получены при использовании модели двойной пористости (рис. 3, *б*).

Результаты обработки кривой восстановления давления до и после проведения гидравлического разрыва пласта, а также показатели технологической эффективности от проведенных мероприятий представлены в таблице.




*а*/*a* *б*/*b*

***Рис. 3.*** *Характерный вид графиков кривой восстановления давления скважин после гидравлического разрыва пласта в билогарифмических координатах: а) модель трещины гидравлического разрыва пласта; б) модель двойной пустотности*

***Fig. 3.*** *Typical form of pressure build-up curves for wells after hydraulic fracturing in logarithmic coordinates: a) hydraulic fracture model; b) model of double voidness*

Аналогичный анализ выполнен для всех мероприятий по гидравлическому разрыву, реализованных на объекте, которые сопровождались гидродинамическими исследованиями в период продолжающегося эффекта. Результаты данного анализа, в ходе которого сопоставлены параметры технологической эффективности ГРП, геометрия образовавшихся трещин, а также скорости закачки жидкости разрыва, визуализированы в виде графика (рис. 4).

Обобщая результаты исследований, отображенных на рис. 4, можно сделать вывод о том, что в рассматриваемом сложнопостроенном карбонатном объекте максимальные значения показателей технологической эффективности ГРП достигаются при создании в пласте сети трещин сложной геометрии. А чем проще геометрия образовавшейся трещины, тем ниже эффективность мероприятия. Таким образом, основным направлением повышения эффективности гидравлического разрыва пласта в рассматриваемых условиях следует считать создание системы трещин сложной геометрии и подбор конкретной технологии, обеспечивающей выполнение данного условия.

Для детализации исследований влияния скоростей закачки жидкости разрыва в ходе проведения мероприятия выполнен анализ фактической динамики давления закачки по всем скважинам – объектам воздействия. Факт зависимости графика, отражающего динамику давления закачки от геометрии образующихся трещин, отмечен также в работах [29, 30]. Установлено, что пересечение трещины ГРП с системой естественных трещин сопровождается характерными колебаниями давления закачки в процессе гидроразрыва и сложным видом соответствующего графика. А с увеличением размеров (раскрытости) естественной трещины интенсивность колебаний нарастает, и чем сложнее сеть естественных трещин, тем

больше условных экстремумов прослеживается на кривой динамики давления закачки. Данный вывод подтвержден в ходе исследований применительно к рассматриваемым условиям, что проиллюстрировано на примере графиков динамики давления и скорости закачки на рассматриваемой ранее скважине с двумя гидроразрывами (рис. 2).

***Таблица.*** *Результаты обработки кривых восстановления давления и технологическая эффективность проведенных мероприятий*

***Table.*** *Results of processing pressure build-up curves and technological efficiency of the measures taken*

| Показатель<br>Indicator | Характеристики гидравлического разрыва пласта<br>Fracturing characteristics | |
|---|---|---|
| | Первого (май 2013 г.)<br>First (May 2013) | Второго (март 2018 г.)<br>Second (March 2018) |
| Модель пласта по данным гидродинамических исследований до проведения гидроразрыва<br>Reservoir model according to well test data before acid fracturing | Двойная пористость<br>Double porosity | Двойная пористость<br>Double porosity |
| Модель пласта по данным гидродинамических исследований после проведения гидроразрыва<br>Reservoir model according to well test data after acid fracturing | Двойная пористость<br>Double porosity | Однородный<br>Homogeneous |
| Модель скважины по данным гидродинамических исследований до проведения гидроразрыва<br>Well model based on hydraulic test data for acid fracturing | Вертикальная<br>Vertical | Вертикальная<br>Vertical |
| Модель скважины по данным гидродинамических исследований после проведения гидроразрыва<br>Well model based on well test data after acid fracturing | Вертикальная<br>Vertical | Вертикальная с трещиной конечной проводимости<br>Vertical fractures with finite conductivity |
| Заключение о геометрии трещины гидроразрыва<br>Conclusion on the hydraulic fracture geometry | Сложная сеть<br>Complex network | Классическое представление<br>Classical view |
| Дополнительная добыча нефти, тыс. т<br>Additional oil production, thousand tons | 9,90 | 0,72 |
| Продолжительность технологического эффекта, мес.<br>Duration of the technological effect, months | 48 | 6 |
| Среднее значение обводненности за время эффекта, %<br>Average value of water cut during the effect time, % | 3,53 | 17,97* |

**Примечание: после проведения кислотного гидравлического разрыва пласта получен резкий рост обводненности с 3,5 до 48,0 %.*

**Note: after acid fracturing, a sharp increase in water cut from 3,5 to 48,0 % was obtained.*

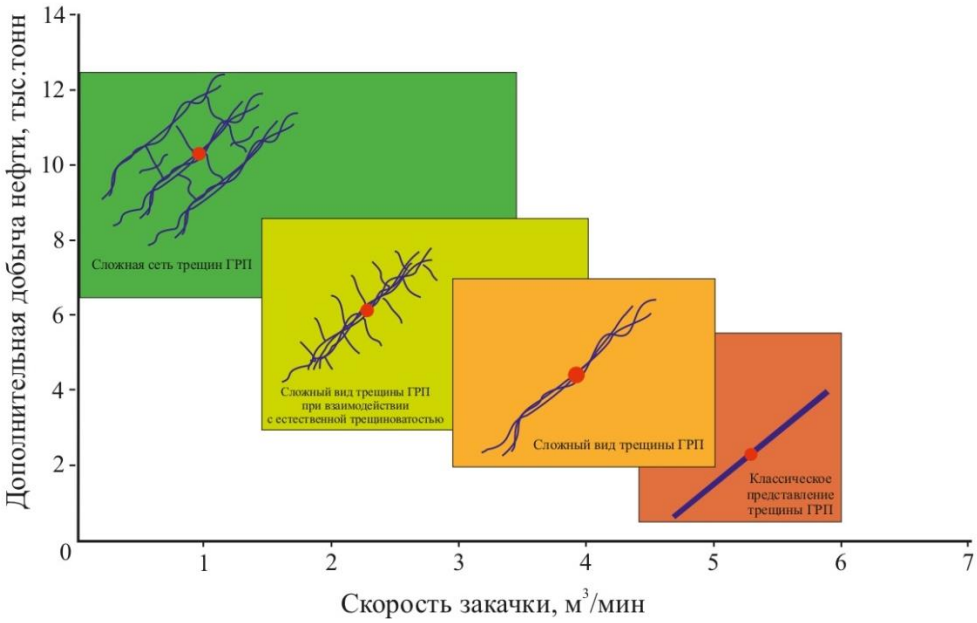



***Рис. 4.*** *Образования сети трещин гидроразрыва пласта от скорости закачки жидкости разрыва*

***Fig. 4.*** *Formation of a network of hydraulic fractures on injection rate of hydraulic fracturing fluid*

На рис. 5, *б* кривая давления закачки имеет простую форму, следовательно и геометрия образовавшейся трещины ГРП соответствует классическому представлению, что подтверждено результатами интерпретации кривой восстановления давления (рис. 3, *а*). Кривая закачки, представленная на рис. 5, *а*, характеризуется очевидными колебаниями, что подтверждает установленный при обработке КВД факт образования сложной сети трещин (рис. 3, *б*).

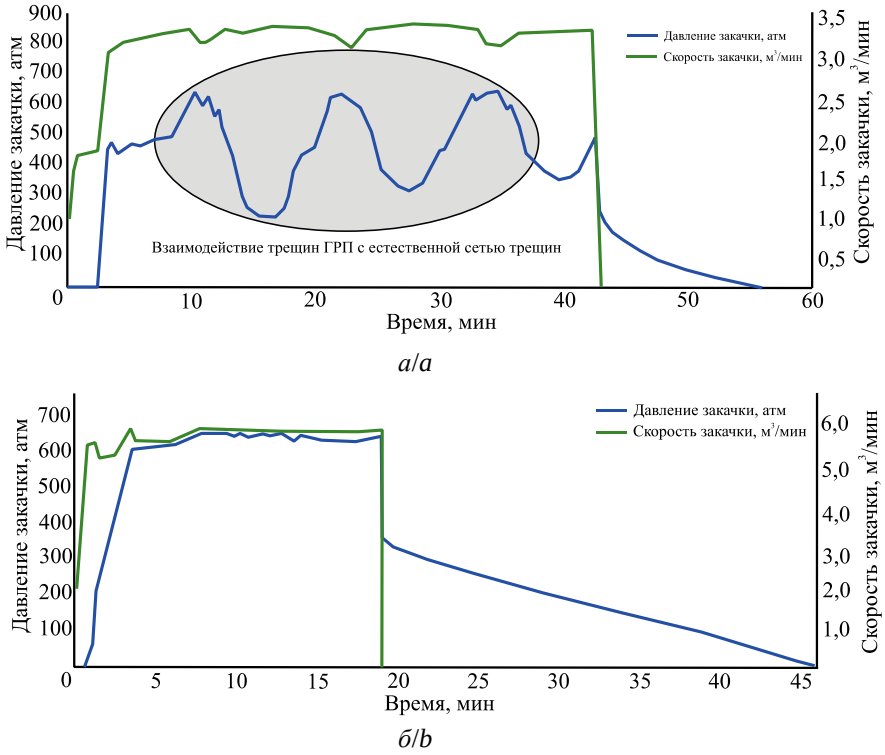



***Рис. 5.*** *Кривая динамики давления и скорости закачки: а) при проведении первого кислотного гидроразрыва; б) при проведении второго кислотного гидроразрыва*

***Fig. 5.*** *Pressure and injection rate dynamics curve: a) during the first acid fracturing; b) during the second acid fracturing*

Таким образом, обобщая выполненные исследования, можно сделать вывод, что оптимальная технология проведения кислотного ГРП в условиях рассматриваемой сложнопостроенной карбонатной залежи должна обеспечивать создание сети трещин разрыва сложной геометрии, что достигается при невысоких скоростях закачки используемой жидкости. В свою очередь, признаком образования сети трещин сложной геометрии является интенсивные колебания давления закачки и выделения нескольких экстремумов на графике, отражающем его динамику.

С целью повышения эффективности проведения ГРП на рассматриваемой залежи возможен следующий вариант оптимизации технологии его проведения:

1) на начальном этапе осуществлять закачку жидкости разрыва на низкой скорости с целью вовлечения большего количества естественных трещин, расположенных в зоне дренирования скважины;
2) далее жидкость разрыва может быть закачана уже в образованные на первом этапе трещины с целью создания нескольких основных трещин;
3) на третьем этапе рекомендуется осуществлять закачку жидкости разрыва для создания гидродинамической связи между трещинами, образовавшимися на первом и втором этапах, с пустотами, расположенными в удаленной части пласта.

### Заключение

Факторы, осложняющие геологическое строения залежей, такие как естественная трещиноватость, кавернозность, плоскости напластования и др., а также напряженное состояние горных пород, существенным образом оказывают влияние на эффективность проведения ГРП. Гидравлический разрыв в сложнопостроенных карбонатных коллекторах зачастую не приводит к образованию трещины в классическом ее понимании – два крыла, распространяющиеся симметрично от ствола скважины, что подтверждено результатами анализа графиков кривой восстановления давления в диагностических билогарифмических координатах.

На эффективность ГРП в совокупности влияют геомеханические свойства, строение горной породы и ее пустотного пространства, а также технологические параметры самого мероприятия.

Трещины гидравлического разрыва пласта могут распространяться в пласт непосредственно от скважин – объектов воздействия (классическое представление), либо через существующую сеть естественных трещин, расположенных в зоне дренирования. Для вовлечения в процесс фильтрации значительного количества естественных трещин и других видов пустотности в процессе проведения ГРП жидкость разрыва целесообразно закачивать при низких скоростях.

Контроль за развитием трещин гидроразрыва должен основываться на достоверной информации о естественной трещиноватости коллектора до проведения мероприятия, а регулирование – посредством мониторинга динамики давления и скорости закачки, что подтверждает результаты исследований [31–38].

Актуальным направлением дальнейших исследований закономерностей проведения гидравлического разрыва пласта является также контроль распространения трещин в горизонтальном и вертикальном направлениях.

## СПИСОК ЛИТЕРАТУРЫ

1. Тайпова В.А., Шайдулдин А.А., Шайдулдин М.А. Роль горизонтальных скважин и гидравлического разрыва в повышении эффективности разработки нефтяных месторождений на примере управления нефтегазовой добычи «АЗНАКАЕВСКНЕФТЬ» ПАО «Татнефть» // Георесурсы. – 2017. – Т. 19. – № 3. – С. 198–203.
2. Reda Abdel Azim. A poroelastic numerical model for simulation of hydraulic fracture propagation: application to Upper Safa formation – Western Desert-Egypt // Petroleum Research. – 2020. – V. 5. – Iss. 1. – P. 39–51.
3. Experimental investigation of the effect of natural fracture size on hydraulic fracture propagation in 3D / Liming Wan, Mian Chen, Bing Hou, Jiawei Kao, Kunpeng Zhang, Weineng Fu // Journal of Structural Geology. – 2018. – V. 116. – P. 1–11.
4. Integrating fracture mapping technologies to optimize stimulations in the Barnett Shale / M.K. Fisher, C. Wright, B. Davidson, A. Goodwin, E. Fielder, W. Buckler, N. Steinsberger // SPE Annual Technical Conference and Exhibition, Society of Petroleum Engineers. – San Antonio, Texas, 2002. – SPE-77441-MS.
5. Contacting more of the Barnett shale through an integration of real-time microseismic monitoring, petrophysics, and hydraulic fracture design / J.L. Daniels, G.A. Waters, J.H. Le Calvez, D. Bentley, J.T. Lassek // SPE annual Technical Conference and Exhibition, Society of Petroleum Engineers. – Anaheim, California, 2007. – SPE-110562-MS.
6. Fisher K., Warpinski N. Hydraulic-fracture-height growth: real data // SPE Production & Operations. – 2013. – V. 27. – Iss. 1. – P. 8–19.
7. Numerical analysis on the optimization of hydraulic fracture networks / Z. Zhang, X. Li, W. Yuan, J. He, G. Li, Y. Wu // Energies. – 2015. – V. 8. – Iss. 10. – P. 12061–12079.
8. Zhou J., Jin Y., Chen M. Experimental investigation of hydraulic fracturing in random naturally fractured blocks // International Journal of Rock Mechanics and Mining Sciences. – 2010. – V. 47. – Iss. 7. – P. 1193–1199.
9. Analysis of fracture propagation behavior and fracture geometry using a tri-axial fracturing system in naturally fractured reservoirs / J. Zhou, M. Chen, Y. Jin, G.-q. Zhang // International Journal of Rock Mechanics and Mining Sciences. – 2008. – V. 45. – Iss. 7. – P. 1143–1152.
10. Beugelsdijk L.J.L., De Pater C.J., Sato K. Experimental hydraulic fracture propagation in a multi-fractured medium // SPE Asia Pacific Conference on Integrated Modelling for Asset Management. – Yokohama, Japan, 2000. – SPE-59419-MS.
11. Fisher M.K., Wright C.A., Davidson B.M. Integrating fracture mapping technologies to improve stimulations in the Barnett shale // SPE Production & Facilities. – 2013. – V. 20. – Iss. 2. – P. 85–93.
12. Numerical investigation of hydraulic fracture propagation in naturally fractured reservoirs based on lattice spring model / Kaikai Zhao, Pengfei Jiang, Yanjun Feng, Xiaodong Sun, Lixing Cheng, Jianwei Zheng // Geofluids. – 2020. – V. 2020. – P. 8845990.
13. What is stimulated reservoir volume? / M.J. Mayerhofer, E.P. Lolon, N.R. Warpinski, C.L. Cipolla, D.W. Walser, C.M. Rightmire // SPE Production & Operations. – 2013. – V. 25. – Iss. 1. – P. 89–98.
14. Acuña J.A. Analytical pressure and rate transient models for analysis of complex fracture networks in tight reservoirs // Unconventional Resources Technology Conference. – San Antonio, Texas, USA, 2016. – URTEC-2429710-MS.
15. Zou C., Dong D., Wang Y. Shale gas in China: characteristics, challenges and prospects (II) // Petroleum Exploration Development. – 2016. – V. 43. – Iss. 2. – P. 166–178.
16. Wang H.Y. HF propagation in naturally fractured reservoirs: complex fracture or fracture networks // Journal National Gas Science Engineering. – 2019. – V. 68. – Article 102911.
17. Improving permeability of coal seams by freeze-fracturing method: The characterization of pore structure changes under low-field NMR / Yunpei Liang, Youting Tan, Fakai Wang, Yongjiang Luo, Zhiqiang Zhao // Energy Reports. – 2020. – V. 6. – P. 550–561.
18. Идентификация ориентации гидравлического разрыва пласта от поверхности с помощью тензора сейсмического момента / Е.В. Бирюльцев, В.А. Рыжов, С.А. Феофилов, И.Р. Шарапов, М.Р. Камилов, Д.А. Рыжов, Е.В. Мокшин // Георесурсы. – 2017. – Т. 19. – № 3. – С. 229–233.
19. Cruz F., Roehl D., Do Amaral Vargas E. Jr. An XFEM element to model intersections between hydraulic and natural fractures in porous rocks // International Journal of Rock Mechanics and Mining Sciences. – 2018. – V. 112. – P. 385–397.
20. Mardashov D., Duryagin V., Islamov S. Technology for improving the efficiency of fractured reservoir development using gel-forming compositions // Energies. – 2021. – V. 14. – P. 8254.
21. Lecampion B., Bunger A., Zhang X. Numerical methods for hydraulic fracture propagation: a review of recent trends // Journal of Natural Gas Science and Engineering. – 2018. – V. 49. – P. 66–83.
22. Ning L., Shicheng Z., Yushi Z. Experimental analysis of hydraulic fracture growth and acoustic emission response in a layered formation // Rock Mechanics Rock Engineering. – 2018. – V. 51. – P. 1047–1062.
23. Experimental and numerical investigations on the vertical propagation of hydraulic fractures in laminated shales / Qinglin Shan, Yan Jin, Peng Tan, Ruxin Zhang // Journal of Geophysics and Engineering. – 2018. – V. 15. – Iss. 4. – P. 1729–1742.
24. Numerical analysis of multiple factors affecting hydraulic fracturing in heterogeneous reservoirs using a coupled hydraulic-mechanical-damage model / Tao Xu, Mingyang Zhai, Bo Huang, Liaoyuan Zhang, Aishan Li, Quansheng Zhang, Zilin Zhang, Lei Wang, Lianchong Li // Geofluids. – 2021. – V. 2021. – Article 5552287.
25. Investigation of production depletion rate effect on the near-wellbore stresses in the two Iranian southwest oilfields / K. Shahbazi, A. Hossein Zarei, A. Shahbazi, A. Ayatizadeh Tanha // Petroleum Research. – 2020. – V. 5. – Iss. 4. – P. 347–361.
26. Елесин А.В., Кадырова А.Ш., Никифоров А.И. Идентификация поля проницаемости трехмерного пласта с использованием результатов геофизических исследований скважин // Георесурсы. – 2021. – Т. 23. – № 1. – С. 106–111.
27. Пономарева И.Н., Мартюшев Д.А. Оценка результатов гидравлического разрыва пласта на основе анализа геолого-промысловых данных // Георесурсы. – 2020. – Т. 22. – № 2. – С. 8–14.
28. Мартюшев Д.А., Слушкина А.Ю. Оценка информативности определения фильтрационных параметров пласта на основе интерпретации кривых стабилизации давления // Известия Томского политехнического университета. Инжиниринг георесурсов. – 2019. – Т. 330. – № 10. – С. 26–32.
29. Гамес Ф. Исследование трещиноватости, моделирование и анализ неопределенностей карбонатного коллектора с включением динамических данных (Ближний Восток) // Георесурсы. – 2018. – Т. 20. – № 3. – С. 154–157.
30. Критерии отбора скважин для гидроразрыва / О.В. Салимов, А.В. Насыбуллин, Р.З. Сахабутдинов, В.Г. Салимов // Георесурсы. – 2017. – Т. 19. – № 4. – С. 368–373.
31. Обоснование применения технологии кислотного гидроразрыва пласта в карбонатных коллекторах газоконденсатных месторождений морского шельфа / Р.У. Рабаев, Р.Н. Бахтизин, Ш.Х. Султанов, В.И. Смурыгин, С.А. Блинов, Т.Б. Бакишев // SOCAR Proceedings. – 2020. – № 4. – С. 60–67.
32. Martyushev D.A., Ponomareva I.N., Galkin V.I. Conditions for effective application of the decline curve analysis method // Energies. – 2021. – V. 14 (20). – Article 6461.
33. Совершенствование методического подхода к планированию мероприятий по гидроразрыву пласта на нефтяных месторождениях / И.В. Буренинна, Л.А. Авдеева, М.А. Халикова, М.В. Герасимова, И.А. Соловьева // Записки горного института. – 2019. – Т. 237. – С. 344–353.
34. Numerical study of vug effects on acid-rock reactive flow in carbonate reservoirs / Z. Huang, H. Xing, X. Zhou, H. You // Advances in Geo-Energy Research. – 2020. – V. 4 (4). – P. 448–459.
35. Effect of injection flow rate on fracture toughness during hydraulic fracturing of hot dry rock (HDR) / Dengdeng Zhuang, Tubing Yin, Qiang Li, You Wu, Xiaosong Tan // Engineering Fracture Mechanics. – 2022. – V. 260. – Article 108207.
36. The effect of fracture growth rate on fracture process zone development in quasi-brittle rock / Lei Chen, Guangqing Zhang, Zhikun Zou, Yuanzhe Guo, Xuelin Zheng // Engineering Fracture Mechanics. – 2021. – V. 258. – Article 108086.

37. Caiyuan Xiao, Guiju Zhang, Yudong Yu. Numerical analysis of hydraulic fracturing processes for multi-layered fractured reservoirs // Energy Reports. – 2021. – V. 7. – P. 467–471.
38. Aymen Al-Ameri, Talal Gamadi. Optimization of acid fracturing for a tight carbonate reservoir // Petroleum. – 2020. – V. 6 (1). – P. 70–79.

*Поступила 08.12.2021 г.*

**Информация об авторах**

***Мартюшев Д.А.***, кандидат технических наук, доцент, доцент кафедры нефтегазовых технологий Пермского национального исследовательского политехнического университета.

***Пономарева И.Н.***, доктор технических наук, доцент, профессор кафедры нефтегазовых технологий Пермского национального исследовательского политехнического университета.

***Филиппов Е.В.***, начальник управления разработки нефтяных и газовых месторождений ООО «ЛУКОЙЛ-ПЕРМЬ».

***Ли Ювэй***, кандидат технических наук, профессор Департамента экологических наук, Университет Ляонин.

UDC622.276

# FORMATION OF HYDRAULIC FRACTURING CRACKS IN COMPLICATED CARBONATE RESERVOIRS WITH NATURAL FRACTURING

**Dmitriy A. Martyushev**[1],
martyushevd@inbox.ru

**Inna N. Ponomareva**[1],
ponomarevain@pstu.ru

**Evgeniy V. Filippov**[2],
evgenij.filippov@lp.lukoil.com

**Yuwei Li**[3],
liyuweibox@126.com

[1] Perm National Research Polytechnic University,
29, Komsomolskiy avenue, Perm, 614990, Russia.

[2] LLC LUKOIL-PERM,
62, Lenin street, Perm, 614990, Russia.

[3] Liaoning University,
66, Chongshan middle road, Huanggu District, Shenyang, 110036, P.R. China.

***The relevance*** *of the research is caused by the fact that the presence of natural fracturing in complex carbonates reservoirs is the main factor that affects the shape and propagation of the network of hydraulic fractures. In such cases, when a hydraulic fracture collides with natural fracturing, there may be a different nature of their interaction, for example, displacement, intersection, etc. Consequently, hydraulic fracturing in complex carbonate reservoirs, characterized by the presence of natural fracturing, can lead to the formation of not a symmetric fracture in its classical sense, but their complex network. Based on field observations (microseismic monitoring and studies of the void space of rocks), various degrees of complexity of hydraulic fractures have been established: from a simple relatively flat single fracture to a rather complex network of fractures.*
***The main aim*** *of the study is to assess the formation of complex networks of hydraulic fractures in naturally fractured carbonate reservoirs.*
***Object:*** *complex carbonate reservoir with a system of natural fractures.*
***Methods:*** *analysis of production, technological, hydrodynamic data and the results of microseismic monitoring in the process of hydraulic fracturing.*
***Results.*** *It was found that hydraulic fracturing in complex carbonate reservoirs often does not lead to the formation of a fracture in its classical sense – two wings propagating symmetrically from the wellbore, which is confirmed by the results of the analysis of the pressure build-up curves in diagnostic logarithmic coordinates. Hydraulic fractures can propagate into the formation directly from wells – targets of influence (classical representation), or through the existing network of natural fractures located in the drainage zone. To involve a significant number of natural fractures and other types of voids in the filtration process during hydraulic fracturing, it is advisable to pump the fracturing fluid at low speeds. Control over the development of hydraulic fractures should be based on reliable information about the natural fracturing of the reservoir before the event, and regulation – through monitoring the dynamics of pressure and injection rate, which confirms the research results.*

***Key words:***
*Injection rate, injection pressure, well testing, rock void space, fracture opening, hydraulic fracturing monitoring, oil production rate.*

## REFERENCES

1. Taipova V.A., Shaidullin A.A., Shamsutdinov M.F. Role of horizontal wells and hydraulic fracturing in increasing the efficiency of oilfield development using the example of oil and gas production department «aznakayevskneft» tatneft PJSC. *Georesursy*, 2017, vol. 19, no. 3, pp. 198–203. In Rus.
2. Reda Abdel Azim. A poroelastic numerical model for simulation of hydraulic fracture propagation: application to upper Safa formation – Western Desert-Egypt. *Petroleum Research*, 2020, vol. 5, Iss. 1, pp. 39–51.
3. Liming Wan, Mian Chen, Bing Hou, Jiawei Kao, Kunpeng Zhang, Weineng Fu. Experimental investigation of the effect of natural fracture size on hydraulic fracture propagation in 3D. *Journal of Structural Geology*, 2018, vol. 11, pp. 1–11.
4. Fisher M.K., Wright C., Davidson B., Goodwin A., Fielder E., Buckler W., Steinsberger N. Integrating fracture mapping technologies to optimize stimulations in the barnett shale. *SPE Annual Technical Conference and Exhibition, Society of Petroleum Engineers*. San Antonio, Texas, 2002. SPE-77441-MS.
5. Daniels J.L., Waters G.A., Le Calvez J.H., Bentley D., Lassek J.T. Contacting more of the barnett shale through an integration of real-time microseismic monitoring, petrophysics, and hydraulic fracture design. *SPE annual Technical Conference and Exhibition, Society of Petroleum Engineers*. Anaheim, California, 2007. SPE-110562-MS.
6. Fisher K., Warpinski N. Hydraulic-fracture-height growth: real data. *SPE Production & Operations*, 2013, vol. 27. Iss. 1, pp. 8–19.
7. Zhang Z., Li X., Yuan W., He J., Li G., Wu Y. Numerical analysis on the optimization of hydraulic fracture networks. *Energies*, 2015, vol. 8, Iss. 10, pp. 12061–12079.
8. Zhou J., Jin Y., Chen M. Experimental investigation of hydraulic fracturing in random naturally fractured blocks. *International Journal of Rock Mechanics and Mining Sciences*, 2010, vol. 47, Iss. 7, pp. 1193–1199.
9. Zhou J., Chen M., Jin Y., Zhang G.-q. Analysis of fracture propagation behavior and fracture geometry using a tri-axial fracturing system in naturally fractured reservoirs. *International Journal of Rock Mechanics and Mining Sciences*, 2008, vol. 45, Iss. 7, pp. 1143–1152.

10. Beugelsdijk L.J.L., De Pater C.J., Sato K. Experimental hydraulic fracture propagation in a multi-fractured medium. *SPE Asia Pacific Conference on Integrated Modelling for Asset Management*. Yokohama, Japan, 2000. SPE-59419-MS.
11. Fisher M.K., Wright C.A., Davidson B.M. Integrating fracture mapping technologies to improve stimulations in the Barnett shale. *SPE Production & Facilities*, 2013, vol. 20, Iss. 2, pp. 85–93.
12. Kaikai Zhao, Pengfei Jiang, Yanjun Feng, Xiaodong Sun, Lixing Cheng, Jianwei Zheng. Numerical investigation of hydraulic fracture propagation in naturally fractured reservoirs based on lattice spring model. *Geofluids*, 2020, vol. 2020, pp. 8845990.
13. Mayerhofer M.J., Lolon E.P., Warpinski N.R., Cipolla C.L., Walser D.W., Rightmire C.M. What is stimulated reservoir volume? *SPE Production & Operations*, 2013, vol. 25, Iss. 1, pp. 89–98.
14. Acuña J.A. Analytical pressure and rate transient models for analysis of complex fracture networks in tight reservoirs. *Unconventional Resources Technology Conference*. San Antonio, Texas, USA, 2016. pp. URTEC-2429710-MS.
15. Zou C., Dong D., Wang Y., Shale gas in China: characteristics, challenges and prospects (II). *Petroleum Exploration Development*, 2016, vol. 43, Iss. 2, pp. 166–178.
16. Wang H.Y. HF propagation in naturally fractured reservoirs: complex fracture or fracture networks. *Journal National Gas Science Engineering*, 2019, vol. 68, Article 102911.
17. Yunpei Liang, Youting Tan, Fakai Wang, Yongjiang Luo, Zhiqiang Zhao. Improving permeability of coal seams by freeze-fracturing method: The characterization of pore structure changes under low-field NMR. *Energy Reports*, 2020, vol. 6, pp. 550–561.
18. Birialtcev E.V., Ryzhov V.A., Feofilov S.A., Sharapov I.R., Kamilov M.R., Ryzhov D.A. Identification of hydraulic fracture orientation from ground surface using the seismic moment tensor. *Georesursy*, 2017, vol. 19, no. 3, pp. 229–233. In Rus.
19. Cruz F., Roehl D., Do Amaral Vargas E. Jr. An XFEM element to model intersections between hydraulic and natural fractures in porous rocks. *International Journal of Rock Mechanics and Mining Sciences*, 2018, vol. 112, pp. 385–397.
20. Mardashov D., Duryagin V., Islamov S. Technology for improving the efficiency of fractured reservoir development using gel-forming compositions. *Energies*, 2021, vol. 14, Article 8254.
21. Lecampion B., Bunger A., Zhang X. Numerical methods for hydraulic fracture propagation: a review of recent trends. *Journal of Natural Gas Science and Engineering*, 2018, vol. 49, pp. 66–83.
22. Ning L., Shicheng Z., Yushi Z. Experimental analysis of hydraulic fracture growth and acoustic emission response in a layered formation. *Rock Mechanics Rock Engineering*, 2018, vol. 51, pp. 1047–1062.
23. Qinglin Shan, Yan Jin, Peng Tan, Ruxin Zhang. Experimental and numerical investigations on the vertical propagation of hydraulic fractures in laminated shales. *Journal of Geophysics and Engineering*, 2018, vol. 15, Iss. 4, pp. 1729–1742.
24. Tao Xu, Mingyang Zhai, Bo Huang, Liaoyuan Zhang, Aishan Li, Quansheng Zhang, Zilin Zhang, Lei Wang, Lianchong Li. Numerical analysis of multiple factors affecting hydraulic fracturing in heterogeneous reservoirs using a coupled hydraulic-mechanical-damage model. *Geofluids*, 2021, vol. 2021, Article 5552287.
25. Shahbazi K., Hossein Zarei A., Shahbazi A., Ayatizadeh Tanha A. Investigation of production depletion rate effect on the near-wellbore stresses in the two Iranian southwest oilfields. *Petroleum Research*, 2020, vol. 5, Iss. 4, pp. 347–361.
26. Elesin A.V., Kadyrova A.S., Nikiforov A.I. Identification of the permeability field for Three-dimensional reservoir using the results of geophysical well survey. *Georesursy*, 2021, vol. 23, no. 1, pp. 106–111. In Rus.
27. Ponomareva I.N., Martyushev D.A. Evaluation of hydraulic fracturing results based on the analysis of geological field data. *Georesursy*, 2020, vol. 22, no. 2, pp. 8–14. In Rus.
28. Martyushev D.A., Slushkina A.Yu. Assessment of informative value in determination of reservoir filtration parameters based on interpretation of pressure stabilization curves. *Bulletin of the Tomsk Polytechnic University, Geo Assets Engineering*, 2019, vol. 330, no.10, pp. 26–32. In Rus.
29. Games F. Fracture characterization, modeling and uncertainty analysis of a carbonate reservoir with integration of dynamic data (Middle East). *Georesursy*, 2018, vol. 20, no. 3, pp. 154–157. In Rus.
30. Sakhabutdinov R.Z., Nasybullin A.V., Salimov O.V., Salimov V.G. The criteria for the selection of wells for hydraulic fracturing. *Georesursy*, 2017, vol. 19, no. 4, pp. 368–373. In Rus.
31. Rabaev R.U., Bakhtizin R.N., Sultanov S.Kh., Smurygin V.I., Blinov S.A., Bakishev T.B. Substantiation of application of the technology of acid hydraulic facing Insea Shelfgas condensate carbonate reservoirs. *SOCAR Proceedings*, 2021, no. 14, pp. 60–67. In Rus.
32. Martyushev D.A., Ponomareva I.N., Galkin V.I. Conditions for effective application of the decline curve analysis method. *Energies*, 2021, vol. 14(20), Article 6461.
33. Bureninia I.V., Avdeeva L.A., Halikova M.A., Gerasimova M.V., Solovieva I.A. Improving the methodological approach to planning measures for hydraulic fracturing in oil fields. *Journal of Mining Institute*, 2019, vol. 237, pp. 344–353. In Rus.
34. Huang, Z., Xing, H., Zhou, X., You, H. Numerical study of vug effects on acid-rock reactive flow in carbonate reservoirs. *Advances in Geo-Energy Research*, 2020, vol. 4 (4), pp. 448–459.
35. Dengdeng Zhuang, Tubing Yin, Qiang Li, You Wu, Xiaosong Tan Effect of injection flow rate on fracture toughness during hydraulic fracturing of hot dry rock (HDR). *Engineering Fracture Mechanics*, 2022, vol. 260, Article 108207.
36. Lei Chen, Guangqing Zhang, Zhikun Zou, Yuanzhe Guo, Xuelin Zheng. The effect of fracture growth rate on fracture process zone development in quasi-brittle rock. *Engineering Fracture Mechanics*, 2021, vol. 258, Article 108086.
37. Caiyuan Xiao, Guiju Zhang, Yudong Yu. Numerical analysis of hydraulic fracturing processes for multi-layered fractured reservoirs. *Energy Reports*, 2021, vol. 7, pp. 467–471.
38. Aymen Al-Ameri, Talal Gamadi. Optimization of acid fracturing for a tight carbonate reservoir. *Petroleum*, 2020, vol. 6 (1), pp. 70–79.


*Received: 8 December 2021.*


**Information about the authors**

***Dmitriy A. Martyushev***, Cand. Sc., assistant professor, Perm National Research Polytechnic University.

***Inna N. Ponomareva***, Dr. Sc, professor, Perm National Research Polytechnic University.

***Evgeniy V. Filippov***, head of the Department for Development of Oil and Gas Fields, LLC LUKOIL-PERM.

***Yuwei Li***, Cand. Sc., professor, Liaoning University.

УДК 550.424.4

# ОСОБЕННОСТИ МИГРАЦИИ ТЯЖЕЛЫХ МЕТАЛЛОВ В СИСТЕМЕ «ПРИДОННАЯ ВОДА – ПОРОВАЯ ВОДА – ПОВЕРХНОСТНЫЙ СЛОЙ ДОННЫХ ОТЛОЖЕНИЙ» ПРИБРЕЖНОЙ ЗОНЫ ВОСТОЧНОЙ ЧАСТИ ФИНСКОГО ЗАЛИВА В ВЕСЕННЕ-ЛЕТНИЙ ПЕРИОД

**Кудрявцева Валентина Александровна**[1],
valenkud@yandex.ru

**Шигаева Татьяна Дмитриевна**[1],
t.sh54@mail.ru

**Панкратова Надежда Максимовна**[2],
nadja.pan@gmail.com

[1] Санкт-Петербургский научно-исследовательский центр экологической безопасности Российской академии наук – обособленное структурное подразделение ФГБУН «Санкт-Петербургский Федеральный исследовательский центр Российской академии наук»,
Россия, 197110, г. Санкт-Петербург, ул. Корпусная, 18.

[2] Sentec AG,
Швейцария, 4106, г. Тервиль, Рингштрасе, 39.

***Актуальность*** *исследования обусловлена необходимостью изучения вторичного загрязнения водной среды металлами в весенне-летнее время, когда активизируются разнообразные биогеохимические процессы, влияющие на изменение физико-химического состояния поверхностного слоя донных отложений.*
***Цель:*** *изучение закономерностей образования и миграции растворимых форм металлов в системе «донные отложения – поровая вода – придонная вода» в весенне-летнее время в прибрежной зоне восточной части Финского залива.*
***Объекты:*** *пробы поверхностного слоя донных отложений, поровой и придонной воды пяти станций прибрежной зоны восточной части Финского залива.*
***Методы:*** *потенциометрический метод определения pH и Eh в донных отложениях и придонной воде. Валовые концентрации Fe, Zn, Cd, Pb, Cu в донных отложениях определяли методом масс-спектрометрии с индуктивно-связанной плазмой (ICP-MS). Концентрации растворенных форм металлов (Fe, Cu, Cd, Zn, Pb) в поровой, придонной водах определяли методом масс-спектрометрии с индуктивно-связанной плазмой на приборе «Agilent 7700x» (фирма «Agilent Technologies»).*
***Результаты.*** *Установлены закономерности образования и миграции растворимых форм металлов на границе «донные отложения – вода» в прибрежной зоне восточной части Финского залива в зависимости от изменений температуры, кислородного режима в придонных водах и окислительно-восстановительных процессов, формирующихся в поверхностном слое донных отложений. Показано, что в конце весеннего сезона в донных отложениях восточной части Финского залива устанавливаются восстановительные условия, способствующие восстановлению гидроксидов железа, накопившихся на дне. В результате возникает поток растворенных форм Fe, Cu, Zn, Cd, Pb в поровые и придонные слои воды. В июле загрязненность поровых и придонных вод всеми изученными металлами снижается.*

***Ключевые слова:***
*Донные отложения, поровые воды, придонные воды, тяжелые металлы, Финский залив.*

## Введение

Быстрые темпы индустриализации и городского развития приводят к существенным загрязнениям окружающей среды потенциально токсичными элементами, которые стали угрозой для здоровья человека и пищевых цепей. Различные виды антропогенной деятельности оказывают большое влияние на экологию водных объектов во многих частях мира, и этот процесс будет только усугубляться. Особенно следует отметить вклад изменения климата в ухудшение экологической обстановки в мире [1, 2]. Глобальное повышение температуры и изменение структуры и состояния донных отложений вызывают серьезные экологические изменения в водных экосистемах [3, 4]. Кроме того, повышенная температура может привести к изменению биодоступности токсикантов, накопленных в прошлом, и повысить вероятность их поглощения водными организмами. Последние, в свою очередь, снижают первичную продуктивность и изменяют микробное разложение, создавая таким образом еще один ключевой контур обратной связи между продуктивностью, изменением климата и загрязнителями окружающей среды. Потепление может также усиливать эвтрофикацию и осаждение загрязнителей в органических отложениях [3].

Загрязнение водных экосистем тяжелыми металлами (ТМ) вызывает серьезную озабоченность в связи с их токсичностью, биоаккумуляцией, латентностью и вытекающими из этого потенциальными экологическими рисками [5]. ТМ поступают в водоемы различными путями и от многих источников, включая естественное выветривание горных пород, атмосферные осадки, эрозию почв, поверхностные стоки, различные виды антропогенной деятельности, и могут переноситься и откладываться в донных отложениях (ДО) временно или постоянно [6]. ДО часто служат эффек-

тивными накопителями загрязняющих веществ и благодаря этому могут обеспечить достоверную картину изменения качества воды с течением времени [7].

Исследование загрязнения донных осадков тяжелыми металлами считается одним из наиболее эффективных способов оценки экологического состояния водного объекта, так как дает объективную информацию относительно уровня загрязнения водоема. При тех или иных изменениях водной среды тяжелые металлы из донных отложений через ряд физических, химических и биологических процессов снова попадают в воду. Помимо «исполнения» функций «поглотителя» и «источника» ТМ, состояние донных отложений тесно связано с благополучием и устойчивостью всей водной экосистемы. Поскольку химическое поведение и экологические эффекты ТМ в водных экосистемах сложны, исследования их поведения в ДО в последние годы стали «горячей» темой. Изменение окислительно-восстановительных условий в ДО для содержащихся в них ТМ имеет два основных следствия: во-первых, происходит изменение валентности металлов, и, во-вторых, изменяются их формы нахождения. Верхний (0–10 см) слой ДО является наиболее активным, непосредственно участвующим в обменных процессах с поровыми и придонными водами [8]. В зависимости от гидрологического сезона в нем могут преобладать либо окислительные, либо восстановительные условия, которые, в свою очередь, определяют формы нахождения ТМ, а следовательно, и их биодоступность для микроорганизмов. Окислительные условия преобладают в зимне-весеннее время года, когда понижение температуры воды способствует повышению содержания растворенного кислорода и замедлению биохимических процессов окисления органического вещества. В летне-осеннее время происходит понижение концентрации растворенного кислорода за счет повышения температуры воды и его интенсивного расходования на биохимические процессы. В результате в поверхностном слое ДО могут возникать восстановительные условия. Следствием этого являются сезонные изменения содержания ТМ в ДО.

Проблема загрязнения ДО потенциально опасными для экосистемы веществами является чрезвычайно актуальной для Финского залива. Активные дноуглубительные работы, строительство портов приводят к вторичному загрязнению акватории в результате взмучивания ДО. В работе Ю. Поляк др. [9] установлено, что в прибрежной зоне Финского залива, в районе Приморска, порта Бронка и Большой Ижоры, значения окислительно-восстановительного потенциала (Eh) ДО находятся в области отрицательных значений –100 мВ (относительно насыщенного хлорсеребряного электрода), что соответствует границе перехода от окисленной к восстановленной зоне. Такие условия способствуют выходу соединений металлов из ДО и загрязнению воды. В районе Графской бухты и Систо-Палкино Eh находится на уровне –250 мВ, т. е. среда еще более восстановленная, и, следовательно, процессы выхода металлов могут усиливаться [9]. Основной причиной снижения окислительно-восстановительного потенциала на этих станциях являются макроводоросли, биомасса которых на станциях с отрицательным значением Eh значительно выше, чем на других станциях. В местах скопления водорослей формируются водорослевые маты, из разлагающейся биомассы которых в воду и придонные слои поступают металлы. Кроме того, дефицит кислорода под водорослевыми матами способствует снижению окислительно-восстановительного потенциала и переходу металлов в подвижную форму, что приводит к дополнительной антропогенной нагрузке на прибрежную экосистему [10]. Данные процессы могут вызвать повышенное загрязнение воды и донных отложений, учитывая масштабный характер, который приобретают «цветения» водорослей в последние годы в условиях глобального потепления климата.

Климатические изменения и, соответственно, вероятность вторичного загрязнения водной среды металлами в летнее время, когда активизируются разнообразные биогеохимические процессы в условиях повышенных температур, обуславливают актуальность исследований в этом направлении. Полученные результаты в перспективе могут найти применение при разработке геохимических моделей трансформации и миграции металлов в водных объектах, а также представляют определенный интерес для госструктур по охране окружающей среды и обеспечению экологической безопасности.

Целью настоящей работы является изучение закономерностей образования и миграции растворимых форм металлов в системе «донные отложения – поровые воды – придонные воды» в весенне-летнее время в прибрежной зоне восточной части Финского залива.

#### Объекты, материалы и методы исследования

Объектом исследования являлись пробы поверхностного слоя ДО, поровые и придонные воды, отобранные в прибрежной мелководной зоне восточной части Финского залива в мае и июле 2018 и 2019 гг. Известно, что верхний десятисантиметровый слой ДО непосредственно участвует в обменных процессах с поровыми и придонными водами [8]. В настоящем исследовании отбор образцов ДО производился пробоотборником Робур-ИЛ с верхнего поверхностного слоя (0–5 см) ДО на расстоянии приблизительно 10 м от береговой линии, где глубина достигала 0,5 м. Придонными водами считался слой воды, прилегающий к ДО. Отбор вод осуществлялся горизонтальным батометром Ван-Дорма. Пробы отбирались в местах постоянно закрепленных станций. Обязательным условием пробоотбора было отсутствие волнения в заливе.

На рис. 1 представлены станции, на которых производился забор проб донных отложений и воды. Станции располагались на северном и южном побережьях восточной части залива, в местах, испытывающих непосредственное антропогенное воздействие, в частности, морских портов и терминалов (Ломоносов, Приморск), недалеко от автотрассы (Большая Ижора), а также в местах, не подверженных внешнему антропогенному воздействию (Репино, Дубки).

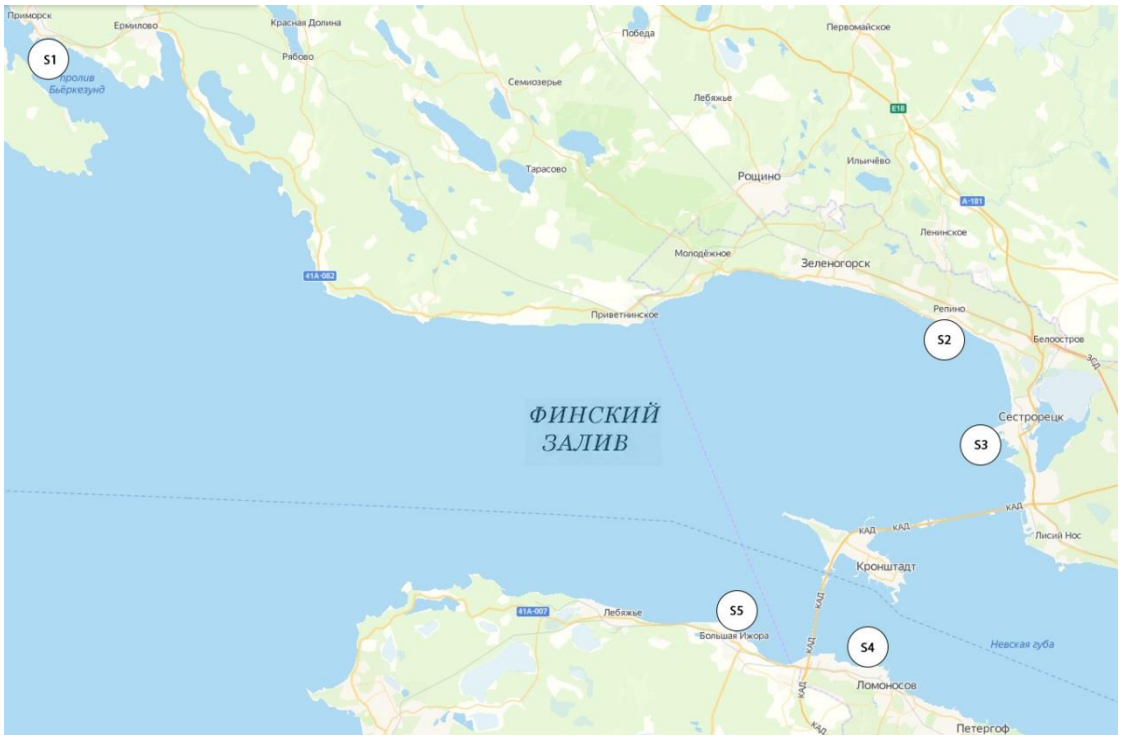



***Рис. 1.*** *Расположение точек отбора проб в восточной части Финского залива: Приморск (S1), Репино (S2), Дубки (S3), Ломоносов (S4), Большая Ижора (S5)*

***Fig. 1.*** *Location of the sampling sites in the eastern Gulf of Finland: Primorsk (S1), Repino (S2), Dubki (S3), Lomonosov (S4), Big Izhora (S5)*

Образцы ДО высушивали при температуре 30 °С. Перед анализом общего содержания ТМ пробы донных осадков дополнительно истирали в порошок в агатовой ступке. Для получения поровой воды пробы ДО отстаивали до разделения жидкой и твердой фаз. Поровые воды отделялись от твердой фазы при центрифугировании со скоростью 3000 оборотов в минуту в течение 30 минут. Перед проведением анализов поровой и придонной воды все пробы отфильтровывались через мембранный фильтр 0,45 мкм.

Измерение pH и Eh проводили с помощью pH-метра pH 420 (фирма «Аквилон»). Измерительными электродами служили комбинированный оксред-электрод InLab®Redox, состоящий из платинового кольцевого измерительного электрода и хлорсеребряного электрода сравнения, и комбинированный pH-электрод, включающий стеклянный pH-электрод и электрод сравнения. Валовые концентрации ТМ (Fe, Zn, Cd, Pb, Cu) определяли методом масс-спектрометрии с индуктивно-связанной плазмой (ICP-MS) на приборе «Agilent 7700x» (фирма «Agilent Technologies»). Концентрации растворенных форм металлов (Fe, Cu, Cd, Zn, Pb) в поровой и придонной водах также определяли методом масс-спектрометрии с индуктивно-связанной плазмой на приборе «Agilent 7700x» (фирма «Agilent Technologies»).

### Результаты и их обсуждение

В ранее проведенных исследованиях В.А. Кудрявцевой и др. [11] методом лазерной седиментографии был определен гранулометрический состав проб ДО. ДО прибрежной зоны восточной части Финского залива представлены песчаными фракциями с незначительным содержанием алевритовых и глинистых частиц (менее 10 %). В табл. 1, 2 представлены значения окислительно-восстановительных потенциалов ДО и средние значения валовых концентраций Fe, Cu, Zn, Cd и Pb в поверхностном слое ДО прибрежной зоны северной и южной частей Финского залива в весенний и летний периоды.

***Таблица 1.*** *Средние значения ± стандартное отклонение валовых концентраций металлов и Eh в поверхностном слое ДО в весенний период*

***Table 1.*** *Mean values ± standard deviation of gross metal concentration and Eh in the surface sediments at the sampling sites in the eastern Gulf of Finland in spring*

| Станция Site | Eh, мВ/mV | Концентрации металлов (мг·кг$^{-1}$) Metal content (mg·kg$^{-1}$) | | | | |
|---|---|---|---|---|---|---|
| | | Fe | Cu | Zn | Cd | Pb |
| S1 | –212 | 18400±2430 | 10,31±1,03 | 36,10±4,69 | 0,301±0,042 | 23,9±3,3 |
| S2 | –142 | 15900±1644 | 3,06±0,28 | 18,92±2,08 | 0,091±0,013 | 14,9±1,9 |
| S3 | –154 | 14200±1420 | 4,68±0,56 | 34,91±4,19 | 0,230±0,032 | 18,5±2,2 |
| S4 | –231 | 17100±2328 | 4,93±0,74 | 18,41±2,21 | 0,110±0,016 | 14,6±1,5 |
| S5 | –216 | 13400±4702 | 7,83±0,94 | 15,37±1,69 | 0,076±0,011 | 15,3±1,8 |

***Таблица 2.*** *Средние значения ± стандартное отклонение валовых концентраций металлов и Eh в поверхностном слое ДО в летний период*

***Table 2.*** *Mean values ± standard deviation of gross metal concentration and Eh in the surface sediments at the sampling sites in the eastern Gulf of Finland in summer*

| Станция Site | Eh, мВ/mV | Концентрации металлов (мг·кг$^{-1}$) Metal content (mg·kg$^{-1}$) | | | | |
|---|---|---|---|---|---|---|
| | | Fe | Cu | Zn | Cd | Pb |
| S1 | –196 | 19400±3472 | 11,21±1,34 | 43,30±5,18 | 0,211±0,031 | 28,7±3,7 |
| S2 | –196 | 13700±1067 | 3,29±0,46 | 18,72±1,87 | 0,112±0,017 | 17,8±1,9 |
| S3 | –16 | 23400±3276 | 4,41±0,53 | 46,51±2,92 | 0,140±0,019 | 18,7±2,2 |
| S4 | –190 | 19400±2560 | 7,10±0,64 | 53,11±6,37 | 0,310±0,046 | 20,6±2,5 |
| S5 | –133 | 18400±2010 | 3,11±0,03 | 21,12±1,69 | 0,057±0,008 | 18,9±1,7 |

Сравнивая концентрации растворенных форм металлов в ДО, следует отметить, что в весенний период наибольшее содержание соединений ТМ наблюдается в Приморске, в июле месяце, наряду с Приморском, ухудшается ситуация в Ломоносове. Эти две станции подвержены антропогенному воздействию в связи с активно развивающимся морским производством и транспортной инфраструктурой.

На всех станциях при переходе от весеннего сезона к летнему происходит увеличение концентрации железа в ДО. Известно, что восстановительный диагенез в ДО подо льдом может начинаться ранней весной, еще при ледоставе, и продолжаться после таяния льда в апреле–мае с повышением температуры воды, в результате чего происходит восстановление соединений железа и переход их в поровую воду [12]. В нашем случае в мае месяце на всех станциях в ДО сформировалась восстановленная среда, что подтверждается значениями окислительно-восстановительного потенциала. Таким образом, при установлении в верхнем слое ДО восстановительных условий гидроксиды железа восстанавливаются до растворенных форм соединений, где железо находится в степени окисления +2, которые затем посредством диффузии мигрируют в верхние водные слои, вследствие чего может иметь место вторичное загрязнение воды этими катионами. Установлена корреляционная связь между Eh и валовым содержанием железа в поверхностном слое ДО со значением коэффициента корреляции 0,65 (при уровне значимости 0,05, n=20). В летний период смещение Eh в область положительных значений приводит к увеличению содержания нерастворимых соединений железа в ДО, что особенно заметно на станции Дубки.

Сезонная динамика изменения соединений меди, цинка, кадмия свинца в ДО практически не связана с изменением окислительно-восстановительного состояния придонного слоя ДО. Все миграционные процессы в большей или меньшей степени связаны с изменением количества гидроксидов железа, что достоверно подтверждается коэффициентом корреляции со значением 0,70 для цинка, 0,55 для свинца при уровне значимости 0,05 (n=20). Для меди и кадмия коэффициенты корреляции равны 0,33 и 0,47, соответственно, т. е. выходят за уровень достоверности. Таким образом степень влияния гидроксидов железа на сорбцию соединений цинка и свинца проявляется значительно больше, чем следовало бы ожидать исходя из их массовой доли в составе частиц донных осадков. Это связано со способностью гидроксидов железа покрывать тонким слоем поверхность других частиц твердого осадка, что значительно увеличивает их рабочую сорбционную площадь [13, 14].

В настоящее время изучение содержания ТМ в ДО связывают с миграцией и распределением химических элементов между донными осадками и придонным водным слоем в условиях климатических изменений, происходящих в последние годы [15–17]. Это особенно актуально для оценки вероятности вторичного загрязнения водной среды металлами. С этой целью определены концентрации растворимых форм железа, меди, цинка, кадмия и свинца в поровой и придонной водах в весенний и летний период. Результаты исследований представлены в табл. 3.

Анализ представленных в табл. 3 концентраций растворенных форм металлов показал, что в весенний период более восстановленная среда ДО способствует восстановлению и растворению соединений железа в осадках и переходу их в поровые растворы. Восстановленная среда в ДО сохранялась в течение всего времени натурных исследований, тем не менее в летний период значения Eh сдвинулись в положительную сторону, в связи с чем процесс диагенетического растворения гидроксидов железа в июле замедлился и одновременно с этим наблюдалось активное накопление $Fe^{2+}$ в придонных водах. Для понимания процесса нами был изучен уровень растворенного кислорода в придонном водном слое. В работе Т.Д. Шигаевой и др. [18] отмечено, что при формировании анаэробных условий на границе раздела «донные отложения – вода» преобладают процессы восстановления, что является одним из важнейших факторов повышения миграционной подвижности химических веществ в ДО и их перехода в придонную воду. В июле–августе в прибрежной зоне Финского залива в основном преобладает штилевая погода, что приводит к деструкционным процессам в придонных водах и под воздействием повышения температур наблюдается снижение концентрации растворенного кислорода в придонном слое с 11 до 4–5 мг/л. Уменьшение концентрации растворенного кислорода в летний период отмечено и в работе [19]. При снижении концентрации растворенного кислорода в придонной воде замедляется процесс окисления растворенных форм Fe2+, что подтверждается отрицательной корреляцией между указанными показателями со значением коэффициента корреляции –0,91 при уровне значимости 0,01.

***Таблица 3.*** *Средние значения ± стандартное отклонение концентрации растворенных форм соединений железа, меди, цинка, кадмия и свинца в поровой и придонной водах в весенний и летний периоды*

***Table 3.*** *Mean values ± standard deviation concentrations of dissolved forms of iron, copper, zinc, cadmium and lead in the pore and bottom waters in spring and summer*

| Элемент, мкг·л$^{-1}$ Element, mkg·l$^{-1}$ | Месяц Month | Тип воды Water type | Станция Site | | | |
|---|---|---|---|---|---|---|
| | | | S1 | S3 | S4 | S5 |
| Fe | Май May | Поровая Pore | 404±40 | 96±8 | 294±18 | 9540±668 |
| | | Придонная Bottom | 37±3 | 163±15 | 434±39 | 557±56 |
| | Июль July | Поровая Pore | 65±5 | 16±1 | 155±14 | 79±6 |
| | | Придонная Bottom | 123±11 | 830±72 | 628±59 | 1040±95 |
| Cu | Май May | Поровая Pore | 3,62±0,18 | 5,21±0,21 | 18,21±1,09 | 4,98±0,19 |
| | | Придонная Bottom | 2,72±0,11 | 3,71±0,18 | 2,89±0,11 | 1,49±0,09 |
| | Июль July | Поровая Pore | 5,78±0,29 | 3,54±0,18 | 5,55±0,31 | 1,82±0,07 |
| | | Придонная Bottom | 1,01±0,21 | 1,42±0,06 | 4,55±0,39 | 0,24±0,01 |
| Zn | Май May | Поровая Pore | 8,14±0,49 | 3,48±0,23 | 15,12±0,61 | 22,02±1,32 |
| | | Придонная Bottom | 2,81±0,17 | 1,48±0,07 | 5,93±0,29 | 4,04±0,16 |
| | Июль July | Поровая Pore | 1,96±0,06 | 0,87±0,05 | 1,97±0,08 | 10,42±0,52 |
| | | Придонная Bottom | 0,71±0,03 | 3,27±0,19 | 1,99±0,11 | 1,24±0,07 |
| Cd | Май May | Поровая Pore | 0,066±0,007 | 0,056±0,006 | 0,171±0,019 | 0,181±0,016 |
| | | Придонная Bottom | 0,051±0,002 | 0,069±0,003 | 0,081±0,006 | 0,052±0,004 |
| | Июль July | Поровая Pore | 0,082±0,006 | 0,018±0,001 | 0,022±0,002 | 0,058±0,004 |
| | | Придонная Bottom | 0,005±0,001 | 0,053±0,005 | 0,013±0,001 | 0,001±0,0005 |
| Pb | Май May | Поровая Pore | 2,67±0,16 | 1,58±0,11 | 2,32±0,18 | 1,37±0,11 |
| | | Придонная Bottom | 0,41±0,03 | 0,31±0,02 | 2,04±0,18 | 0,32±0,02 |
| | Июль July | Поровая Pore | 1,18±0,07 | 0,79±0,06 | 1,62±0,11 | 1,68±0,15 |
| | | Придонная Bottom | 0,63±0,05 | 0,65±0,05 | 0,86±0,07 | 0,59±0,05 |

Весной из ДО вместе с соединениями железа в поровый раствор переходили сорбированные на них соединения меди, цинка, кадмия и свинца. На границе поровый раствор – придонная вода возникает градиент концентрации растворенных форм железа, меди, цинка, кадмия и свинца. Это должно способствовать выходу растворенных форм металлов из порового раствора в придонную воду вследствие концентрационной диффузии, тем самым создавая угрозу вторичного загрязнения водного объекта ТМ. В летний период для растворенных форм меди, цинка и кадмия отмечена тенденция к уменьшению их содержания в придонной воде за исключением станции S4 для меди и S3 для цинка, где концентрация растворенных форм увеличивается. Что касается свинца, летом наблюдается увеличение растворимых форм в придонном слое. Для объяснения процессов, происходящих на границе поровая вода – придонная вода в летний период, были произведены расчеты корреляционных зависимостей между концентрациями ТМ и содержанием растворенного кислорода в придонном слое водной системы. Связь между этими параметрами не установлена. На исследуемых станциях в летний период наблюдалось незначительное закисление придонного водного слоя. Величина pH изменялась от 7,2 до 6,8, корреляционная связь этого параметра с содержанием соединения ТМ не установлена. Не установлена и корреляция между концентрациями ТМ в придонной воде и поровом растворе в летний период, что, вероятно, указывает на изменение химического состава соединений ТМ в поровой воде под воздействием разных процессов.

Для оценки изменения поглотительной способности ДО прибрежной зоны восточной части Финского залива был выполнен расчет индивидуальных коэффициентов донной аккумуляции (КДА) металлов в весенний и летний периоды. КДА определяли по формуле

$$КДА = C_{до} / C_{прид.\ вода},$$

где $C_{до}$ – концентрация загрязняющего соединения в ДО, мкг/кг; $C_{прид.\ вода}$ – концентрация загрязняющего соединения в придонной воде, отобранной одновременно в этой же точке, мкг/л. Обычно с помощью КДА оценивается экологическая обстановка в водных системах, но при этом в расчетной формуле используется концентрация растворенных форм металлов поверхностного слоя воды и все критерии оценки степени химического загрязнения приводятся для поверхностных вод. В нашем случае при помощи параметра КДА мы оцениваем только изменение поглотительной способности ДО в условиях изменения физико-химических параметров на границе донные отложения – придонный водный слой в весенне-летний период.

На рис. 2 представлены индивидуальные значения КДА соединений железа, меди, цинка, кадмия и свинца в весенне-летний период.

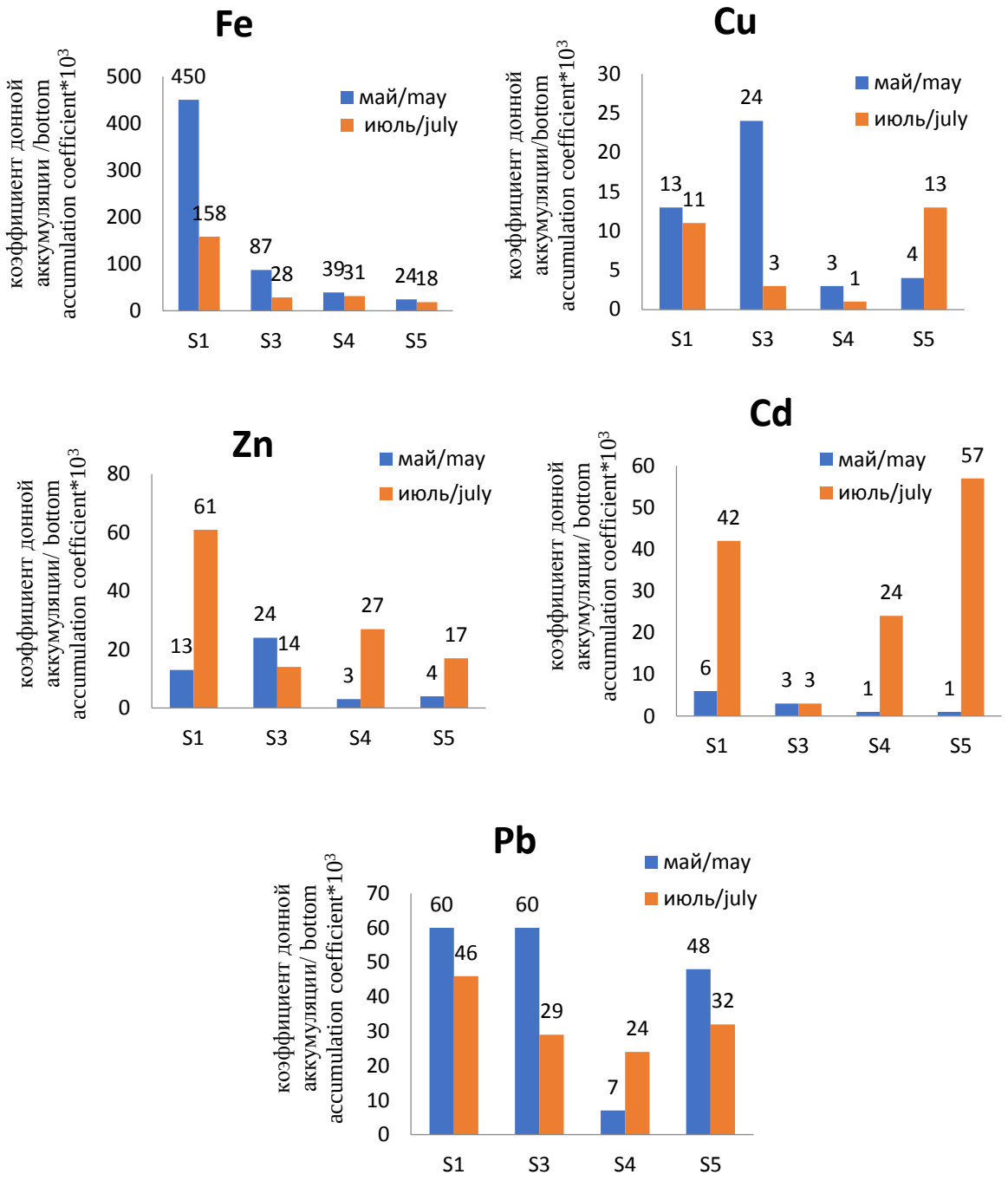



***Рис. 2.*** *КДА для Fe, Cu, Zn, Cd, Pb в весенний и летний период*

***Fig. 2.*** *Bottom accumulation coefficient for Fe, Cu, Zn, Cd, Pb in spring and summer*

Из рис. 2 видно, что самыми высокими поглотительными свойствами по отношению к соединениям железа обладают ДО Приморска. В летний период по сравнению с весной величина КДА снижается в три раза на всех станциях за исключением Большой Ижоры. Для соединений меди снижение поглотительной способности ДО отмечено только для двух станций – Дубки и Ломоносов, в ДО Приморска КДА не изменился, а поглотительная способность поверхностного слоя ДО Большой Ижоры увеличилась в 3 раза. Максимально увеличился в летний период КДА для соединений цинка (в 9 раз) на станции Ломоносов и в 24 и 57 раз для соединений кадмия на станциях Ломоносов и Большая Ижора. Для соединений свинца только на станции Ломоносов наблюдается увеличение поглотительной способности ДО в июле, на остальных станциях этот показатель снижается.

### Заключение

ДО при определенных условиях могут быть источником загрязнения водоемов из-за перераспределения и миграции накопившихся загрязняющих веществ. Установлены закономерности образования и миграции растворенных форм металлов на границе донные отложения – вода в прибрежной зоне восточной части Финского залива в весенне-летний период. Определяющее влияние на эти процессы оказывают окислительно-восстановительные условия, сформированные в поверхностном слое ДО, сезонные изменения кислородного режима в придонном слое и температурный режим. Результаты натурных исследований показали, что в мае в прибрежных ДО восточной части Финского залива устанавливаются восстановительные условия, способствующие восстановлению гидроксидов железа, накопившихся на дне. При этом фиксируется рост концентраций соединений, в составе которых железо находятся в низшей степени окисления +2 в поровой воде. Поскольку концентрации этих соединений $Fe^{2+}$ в поровой воде значительно выше, чем в придонной, возникает градиент концентраций на поверхности раздела фаз вода–дно, который приводит к диффузионному потоку этих соединений в придонные слои воды, при этом основной поток наблюдается весной в поровые воды, а летом в придонные воды. Уменьшение концентрации растворенного кислорода в июле позволяет растворенным формам железа преодолевать границу поровая вода – придонная вода.

В процессе восстановления и растворения гидроксидов железа тяжелые металлы, локализованные на поверхности гидроксидов, мобилизуются и мигрируют вместе с растворенными формами соединений $Fe^{2+}$ в поровые воды. В результате в мае прибрежные донные осадки служат источником поступления растворенных форм Fe, Cu, Zn, Cd, Pb из ДО в придонные воды. В июле загрязненность поровых и придонных вод изученными металлами снижается. Таким образом, на основании проведенных исследований можно сделать вывод о достаточно высокой изменчивости содержания растворимых форм исследуемых металлов в верхнем придонном слое прибрежной зоны Финского залива в весенне-летний период, которые активно вовлекаются в процесс массообмена на границе донные отложения – поровая вода – придонная вода.

*Работа выполнена при поддержке Минобрнауки России (по теме АААА-А19-119020190122-6).*

### СПИСОК ЛИТЕРАТУРЫ

1. Climate change and human occupations in the Lake Daihai basin, north-central China over the last 4500 years: ago-archeological perspective / L. Xu, Y. Liu, Q. Sun, J. Chen, P. Cheng, Z. Chen // Journal of Asian Earth Science. – 2017. – V. 138. – P. 367–377.
2. Gladyshev M.I., Gubelit Yu.I. Green tides: new consequences of the eutrophication of natural waters (invited review) // Contemporary Problems of Ecology. – 2019. – V. 12. – № 2. – P. 109–125.
3. Голубков С.М. Влияние климатических колебаний на структуру и функционирование экосистем континентальных водоемов // Сибирский экологический журнал. – 2021. – Т. 28. – № 1. – С. 1–12.
4. Effects of climate change on streamflow extremes and implications for reservoir inflow in the United States / B.S. Naz, S.C. Kao, M. Ashfaq, H. Gao, D. Rastogi, S. Gangrade / Journal of Hydrology. – 2018. – V. 556. – P. 359–370.
5. Niinemets U., Karhu A., Notes P. Environmental feedbacks in temperate aquatic ecosystems under global change: why do we need to consider chemical stressors? // Regional Environmental Change. – 2017. – V. 17. – № 7. – P. 2079–2096.
6. Heavy metal contamination in sediments from typical lakes in the five geographic regions of China: distribution, bioavailability, and risk / W. Guo, S. Huo, B. Xi, J. Zhang, F. Wu // Ecological Engineering. – 2015. – V. 81. – P. 243–255.
7. Усманов И.А., Магай М.П Донные отложения как источник загрязнения природных вод // Экологический вестник Северного Кавказа. – 2020. – Т. 16. – № 1. – С. 73–77.
8. Cieslewicz J., Kobierski M., Cichosz M. Geochemical assessment of lake sediments in protected areas in Poland – a search for reference condition // Journal of Limnology. – 2018. – V. 77. – № 1. – P. 35–45.
9. Мониторинг Финского залива Балтийского моря: влияние антропогенных факторов на биогеохимические процессы в прибрежной зоне / Ю.М. Поляк, Ю.И. Губелит, Т.Д. Шигаева, В.А. Кудрявцева, Л.Г. Бакина, Г. Дембска, Г. Пазиковска-Сапота // Проблемы экологического мониторинга и моделирования экосистем. – 2018. – Т. 29. – № 2. – С. 99–117.
10. Can the «Green Tides» affect the metal distribution in the coastal sediments? A case study in the Eastern Gulf of Finland, Baltic Sea / Y.I. Gubelit, Y.M. Polyak, T.D. Shigaeva, L.G. Bakina, V.A. Kudryavtseva // Contemporary Problems of Ecology. – 2020. – V. 13. – № 2. – P. 113–126.
11. Кудрявцева В.А., Шигаева Т.Д., Конаков В.Г. Влияние свойств поверхностного слоя донных отложений прибрежной зоны восточной части Финского залива на содержание тяжелых металл // Вода: химия и экология. – 2016. – № 11. – С. 16–23.
12. Manganese reduction by microbes from oxic regions of lake Vanda (Antarctica) water column / B.J. Bratina, B.S. Stevenson, W.J. Green, T.M. Schmidt // Applied and Environmental Microbiology. – 1998. – V. 64. – № 10. – P. 3791–3797.
13. Линник П.Н., Жежеря В.А., Жежеря Т.П. Миграция химических элементов в системе «донные отложения – вода» поверхностных водоемов при воздействии различных факторов среды // Экологическая химия. – 2016. – Т. 25. – № 4. – С. 222–240.
14. Папина Т.С. Транспорт и особенности распределения тяжелых металлов в ряду: вода – взвешенное вещество – донные отложения речных экосистем. Аналитический обзор. Сер. Экология. Вып. 62. – Новосибирск: ГПНТБ, 2001. – 58 с.
15. Коломийцев И.В., Корженский Б.И., Толкачев Г.Ю. Роль поровых растворов отложений водоемов в процессах самоочищения и вторичного загрязнения водной среды // Экологические системы и приборы. – 2019. – № 8. – С. 16–25.

16. Липатникова О.А., Лубкова Т.Н., Коробова Н.А. Формы нахождения микроэлементов в воде и донных отложениях Пироговского водохранилища // Вестник Московского университета. Серия 4. Геология. – 2020. – № 4. – С. 59–68.
17. Брезгунов В.С. Содержание Mn и Pb в поровых водах среднего и южного Каспия в связи с оценкой геохимического состояния Каспийского моря // Вода: химия и экология. – 2014. – № 7 (73). – С. 24–28.
18. Шигаева Т.Д., Поляк Ю.М., Кудрявцева В.А. Окислительно-восстановительный потенциал как показатель состояния объектов окружающей среды // Биосфера. – 2020. – Т. 12. – № 3. – С. 111–124.
19. Степанова И.Э. Качество воды Рыбинского водохранилища: режим растворенного кислорода // Водное хозяйство России. – 2016. – № 5. – С. 23–34.
20. Методика «Критерии оценки экологической обстановки территорий для выявления зон чрезвычайной экологической ситуации и зон экологических бедствий». – М.: Министерство природных ресурсов РФ, 1992. – 63 с.

*Поступила 23.12.2021 г.*

**Информация об авторах**

***Кудрявцева В.А.***, кандидат химических наук, заведующая лабораторией изучения миграционных форм экотоксикантов в окружающей среде Санкт-Петербургского научно-исследовательского центра экологической безопасности Российской академии наук – обособленного структурного подразделения Санкт-Петербургского Федерального исследовательского центра Российской академии наук.

***Шигаева Т.Д.***, кандидат химических наук, старший научный сотрудник лаборатории изучения миграционных форм экотоксикантов в окружающей среде Санкт-Петербургского научно-исследовательского центра экологической безопасности Российской академии наук – обособленного структурного подразделения Санкт-Петербургского Федерального исследовательского центра Российской академии наук.

***Панкратова Н.М.***, инженер по разработке сенсоров, Sentec AG.

UDC 550.424.4

# FEATURES OF MIGRATION OF HEAVY METALS IN THE SYSTEM «BOTTOM WATER – PORE WATER – SURFACE LAYER OF BOTTOM SEDIMENTS» OF THE COASTAL ZONE IN THE EASTERN PART OF THE GULF OF FINLAND

**Valentina A. Kudryavtseva**[1],
valenkud@yandex.ru

**Tatyana D. Shigaeva**[1],
t.sh54@mail.ru

**Nadezda M. Pankratova**[2],
nadja.pan@gmail.com

[1] Scientific Research Centre for Ecological Safety of the Russian Academy of Sciences,
18, Korpusnaya street, St. Petersburg, 197110, Russia.

[1] Sentec AG,
39, Ringstrasse, Therwil, 4106, Switzerland.

***The relevance*** *of the research is caused by the need to study the secondary pollution of the aquatic environment with metals in spring-summer, when various biogeochemical processes are activated that affect the change in the physicochemical state of the surface layer of bottom sediments.*
***The aim*** *of the research is to study the patterns of formation and migration of soluble forms of metals in the system «bottom sediments – pore water – bottom water» depending on the spring-summer season and conditions of the coastal zone in the eastern part of the Gulf of Finland.*
***Objects:*** *samples of the surface layer of bottom sediments, pore and bottom water from five stations in the coastal zone in the eastern part of the Gulf of Finland.*
***Methods:*** *potentiometric method for determining pH and Eh in sediments and bottom water. The bulk concentrations of Fe, Zn, Cd, Pb, Cu in bottom sediments were determined by inductively coupled plasma mass spectrometry (ICP-MS). Concentrations of dissolved forms of metals (Fe, Cu, Cd, Zn, Pb) in the pore, bottom waters were determined by inductively coupled plasma mass spectrometry on an Agilent 7700x instrument (Agilent Technologies).*
***Results.*** *The authors have established the regularities of the formation and migration of soluble forms of metals at the «bottom sediment – water» boundary in the coastal zone of the eastern part of the Gulf of Finland, depending on temperature changes, oxygen regime in bottom waters and redox processes formed in the surface layer of bottom sediments. It is shown, that at the end of the spring season, reducing conditions are established in the bottom sediments of the eastern part of the Gulf of Finland, contributing to the reduction of iron hydroxides accumulated on the bottom. As a result, there is a flow of dissolved forms of Fe, Cu, Zn, Cd, Pb into the pore and bottom layers of water. In July, the pollution of pore and bottom waters with all studied metals decreases.*

***Key words:***
*Bottom sediments, pore waters, bottom waters, heavy metals, Gulf of Finland.*

*The research was supported by the Ministry of Education and Science of the Russian Federation (subject AAAA-A19-119020190122-6).*

## REFERENCE

1. Xu L., Liu Y., Sun Q., Chen J., Cheng,P., Chen Z. Climate change and human occupations in the Lake Daihai basin, north-central China over the last 4500 years: a geo-archeological perspective. *Journal of Asian Earth Science*, 2017, vol. 138, pp. 367–377.
2. Gladyshev M.I., Gubelit Yu.I. Green tides: new consequences of the eutrophication of natural waters (invited review). *Contemporary Problems of Ecology*, 2019, vol. 12, no. 2, pp. 109–125.
3. Golubkov S.M. The influence of climatic fluctuations on the structure and functioning of ecosystems of continental water bodies. *Siberian Journal of Ecology*, 2021, vol. 28, no. 1, pp. 1–12. In Rus.
4. Naz B.S., Kao S.C., Ashfaq M., Gao H., Rastogi D., Gangrade S. Effects of climate change on streamflow extremes and implications for reservoir inflow in the United States. *Journal of Hydrology*, 2018, vol. 556, pp. 359–370.
5. Niinemets U., Kahru A., Noges P. Environmental feedbacks in temperate aquatic ecosystems under global change: why do we need to consider chemical stressors? *Regional Environmental Change*, 2017, vol. 17, no. 7, pp. 2079–2096.
6. Guo W., Huo S., Xi B., Zhang J., Wu F. Heavy metal contamination in sediments from typical lakes in the five geographic regions of China: distribution, bioavailability, and risk. *Ecological Engineering*, 2015, vol. 81, pp. 243–255.
7. Usmanov I.A., Magay M.P Bottom sediment as a natural water. *The North Caucasus Ecological Herald*, 2020, vol. 16, no. 1, pp. 73–77. In Rus.
8. Cieslewicz J., Kobierski M., Cichosz M. Geochemical assessment of lake sediments in protected areas in Poland – a search for reference condition. *Journal of Limnology*, 2018, vol. 77, no. 1, pp. 35–45.
9. Polyak Y.M., Gubelit Y.I, Shigaeva T.D., Kudryavtseva V.A., Bakina L.G., Dembska G. Pazikowska-Sapota G. Monitoring of the Gulf of Finland, Baltic Sea: anthropogenic pressure on biogeochemical, processes in the coastal zone. *Problems of Ecological Monitoring and Ecosystem Modelling*, 2018, vol. 29, no. 2, pp. 99–117. In Rus.
10. Gubelit Y.I., Polyak Y.M., Shigaeva T.D., Bakina L.G., Kudryavtseva V.A. Can the «Green Tides» affect the metal distribution in the coastal sediments? A case study in the Eastern Gulf of Finland, Baltic Sea. *Contemporary Problems of Ecology*, 2020, vol. 13, no. 2, pp. 113–126.
11. Kudryavtseva V.A., Shigaeva T.D., Konakov V.G. Influence of properties of a superficial layer of ground sediments of a coastal zone of east part of Gulf of Finland on a content of heavy metals. *Water: Chemistry and Ecology*, 2016, no. 11, pp. 16–23. In Rus.

12. Bratina B.J., Stevenson B.S., Green W.J., Schmidt T.M. Manganese reduction by microbes from oxic regions of lake Vanda (Antarctica) water column. *Applied and Environmental Microbiology*, 1998, vol. 64, no. 10, pp. 3791–3797.
13. Linnik P.N., Zhezherya V.A., Zhezherya T.P. Migration of chemical elements in the «bottom sediments – water» system of surface water bodies influenced by different environmental factors. *Ecological Chemistry*, 2016, vol. 25, no. 4, pp. 222–240. In Rus.
14. Papina T.S. *Transport i osobennosti raspredeleniya tyazhelyh metallov v ryadu: voda –vzveshennoe veshchestvo – donnye otlozheniya rechnykh ekosistem. Analiticheskiy obzor. Ser. Ekologiya (62)* [Transport and distribution features of heavy metals in the series: water – suspended matter – bottom sediments of river ecosystems. Analytical review. Ser. Ecology (62)]. Novosibirsk, GPNTB Publ., 2001. 58 p.
15. Kolomiytsev N.V., Korzhenevskiy B.I., Tolkachev G.Y. The role of pore solutions of sediments in the processes of self-purification and secondary pollution of aquatic environment. *Ecological Systems and Devices*, 2019, no. 8, pp. 16–25. In Rus.
16. Lipatnikova O.A., Lubkova T.N., Korobova N.A. Trace element speciation in water and bottom sediments of the Pirogov Water Reservoir. *Vestnik Moskovskogo Universiteta. Seriya 4: Geologiya*, 2020, no. 4, pp. 59–68. In Rus.
17. Brezgunov B.S. Content of Mn and Pb in pore waters of the Middle and Southern Caspian in connection with the evaluation of geochemical status of the Caspian Sea. *Water: Chemistry and Ecology*, 2014, no. 7 (73), pp. 24–28. In Rus.
18. Shigaeva T.D., Polyak Yu.M., Kudryavtseva V.A. The redox potential as an index of the state of environmental entities. *Biosfera*, 2020, vol. 12, no. 3, pp. 111–124. In Rus.
19. Stepanova I.E. Kachestvo vody Rybinskogo vodokhranilishcha: rezhim rastvorennogo kisloroda [Rybinsk reservoir water quality: dissolved oxygen regime]. *Vodnoe khozyaistvo Rossii*, 2016, no. 5, pp. 23–34.
20. *Metodika «Kriterii otsenki ekologicheskoy obstanovki territory dlya vyyavleniya zon chrezvychaynoy ekologicheskoy situatsii i zon ekologicheskikh bedstvy»* [Methodology «Criteria for assessing the ecological situation of territories for identifying zones of ecological emergency and zones of ecological disasters»]. Moscow, Ministry of Natural Resources of the Russian Federation, 1992. 63 p.

*Received: 23 December 2021.*

**Information about the authors**

***Valentina A. Kudryavtseva***, Cand. Sc., head of laboratory, Scientific Research Centre for Ecological Safety of the Russian Academy of Sciences.

***Tatyana D. Shigaeva***, Cand. Sc., senior scientist, Scientific Research Centre for Ecological Safety of the Russian Academy of Sciences.

***Nadezda M. Pankratova***, sensor development engineer, Sentec AG.

УДК 51-74

# ЧИСЛЕННОЕ РЕШЕНИЕ ОБРАТНЫХ ЗАДАЧ ПРИ МАТЕМАТИЧЕСКОМ МОДЕЛИРОВАНИИ ГЕОЛОГИЧЕСКИХ СИСТЕМ

**Тарасенко Елена Олеговна**[1],
galail@mail.ru

**Гладков Андрей Владимирович**[1],
gavandrew@mail.ru

[1] Северо-Кавказский федеральный университет,
Россия, 355009, г. Ставрополь, ул. Пушкина, 1, корпус 2.

***Актуальность.*** *Математическое моделирование геологических систем является актуальным как теоретически, так и практически. Обратные прикладные задачи позволяют систематизировать знания об исследуемых моделях. В настоящей статье рассматриваются задачи об оценке глубины заложения заряда взрывчатого вещества в просадочных грунтах с целью их уплотнения и, как следствие, снижения просадочности. Такой метод уплотнения широко применяется при проведении работ на объектах гражданского строительства, изменении рельефных особенностей местности и т. д. Следует отметить, что на территории России порядка 17 % поверхности земной коры представлены просадочными лёссами.*

***Цель:*** *аналитическое и численное моделирование решения обратных задач в геологических системах при уплотнении лёссов глубинными взрывами.*

***Методы:*** *итерационные методы решения задач, методы компьютерного моделирования в рамках исследования геологических систем, статистика выводов.*

***Результаты.*** *Предлагаются аналитические и численные решения рассматриваемой обратной прикладной задачи геологической системы. Описаны решения при условиях полного поглощения газа, образованного в результате взрыва сосредоточенного заряда, окружающим его просадочным грунтом (происходит уплотнение лёсса) и полного отражения газа от грунта (происходит выброс на поверхность). Подробно математически изучены различные состояния просадочного лёсса с характерными свойствами изотропности и анизотропности геологической системы. Проведён вычислительный эксперимент поиска приближённого итерационного решения обратной задачи для определения глубины проведения взрывов с целью уплотнения лёссов. Вычисления проводились с учётом имеющихся экспериментальных данных на примере объекта гражданского строительства Северного Кавказа.*

***Выводы.*** *Проведённые исследования указывают на адекватность предлагаемого подхода оценки глубины заложения заряда. Численное решение задачи найдено с высокой точностью и с минимальными вычислительными затратами.*

***Ключевые слова:***
*Обратная задача, лёсс, уплотнение просадочных грунтов, математическое моделирование, численные методы.*

## Введение

Изучение геологических систем территории России показало, что порядка 17 % поверхности земной коры представлены лёссами. Наибольшее распространение (не менее 80 %) они получили в Северных регионах Кавказа, Южной части России, большей части территории Сибири (Западная, Восточная и Южная), Якутии, Поволжье и других регионах России.

Грунты Северного Кавказа представлены просадочными толщами второго типа грунтовых условий. В расположении лёссовых грунтов наблюдается зональность их залегания. При этом мощность просадочных слоёв составляет порядка 50–60 м, в отдельных районах до 100 м (Будённовский, Благодарненский районы Ставропольского края). Лёссы демонстрируют величину расчётной просадки до 2,5 м от собственного веса. Исследования геологических систем региона показали строение лёссовых грунтов с выраженным характером цикличности – расположение слоями в горизонтальной плоскости лёссовидных суглинков и лёссов с погребёнными почвами [1, 2].

В лёссах имеются в больших количествах макропоры, они позволяют воде глубоко проникать в структуру грунта, вследствие чего происходит его стремительное размокание и неравномерные деформации в виде просадок [3–7].

Для исключения просадочности лёссовых грунтов на площадках гражданского строительства или рельефных склонах территорий используется метод уплотнения грунтов глубинными взрывами [8–13]. В работах [14, 15] предложены математические модели геологических изменений при таком методе уплотнения. Авторы в [16] доказывают разрешимость краевых задач с заданными начальным и граничными условиями в рамках математического моделирования глубинного взрыва.

При проведении прикладного математического моделирования геологических систем возникает проблема решения и исследования разнообразных прямых и обратных задач [17]. В настоящем исследовании приведём решение обратной инженерно-геологической задачи – оценка глубины заложения взрывчатого вещества с целью уплотнения лёссов глубинными взрывами как аналитически, так и численно.

## Математическое моделирование геологических систем при уплотнении лёссов глубинными взрывами

Математически диффузионный процесс проникновения атомов газа в процессе уплотнения лёссов глубинными взрывами в случае сосредоточенного заряда предлагается описать дифференциальным уравнением:

$$\frac{\partial q}{\partial t}+u\frac{\partial q}{\partial x_1}+\varpi\frac{\partial q}{\partial x_3}+\alpha q=$$
$$=\frac{\partial}{\partial x_1}K_{x_1}\frac{\partial q}{\partial x_1}+\frac{\partial}{\partial x_2}K_{x_2}\frac{\partial q}{\partial x_2}+\frac{\partial}{\partial x_3}K_{x_3}\frac{\partial q}{\partial x_3}+f, \quad (1)$$

здесь $q$ – плотность уплотнённого грунта при глубинном взрыве; $u$ – параметр горизонтального распространения газа (вектор, направленный вдоль оси абсцисс $Ox_1$); $K_{x_1}$, $K_{x_2}$, $K_{x_3}$ – диффузионные параметры; $\varpi$ – параметр гравитационного изменения газа, распространяемого в камуфлетной полости; $\alpha$ – параметр взаимодействия газа, появившегося в результате взрыва, и лёссового просадочного грунта; $f$ – мощность заряда, описываемая функцией внешних сил воздействия на геологическую систему.

Учитывая, что в уравнении (1) параметры горизонтального распространения газа и диффузии определяются исходя из результатов измерений, уравнение диффузии является полуэмпирическим. Сравнивая (1) с известными видами дифференциальных уравнений, можно сделать вывод, что оно является линейным дифференциальным уравнениям в частных производных параболического типа.

Опишем диффузионное распространение атомов газа в результате глубинного грунтового взрыва сосредоточенным зарядом начально-граничной задачей [1411]

$$\frac{\partial q}{\partial t}+\sum_{i=1}^{3}u_i\frac{\partial q}{\partial x_i}+\alpha q+\sum_{i=1}^{3}\sum_{j=1}^{3}\frac{\partial}{\partial x_i}K_{ij}\frac{\partial q}{\partial x_j}=0, \quad (2)$$

$$q\left(t_0,x_1,x_2,x_3\right)=$$
$$=Q\cdot\delta\left(x_1-x_1^0\right)\delta\left(x_2-x_2^0\right)\delta\left(x_3-x_3^0\right), \quad (3)$$

$$t\in\left[t_0,T\right],\ K_{33}\frac{\partial q}{\partial x_3}\bigg|_{x_3=x_3^0}=0,\ t>t_0, \quad (4)$$

при поверхностном выбросе, на глубине проведения взрыва $x_3^0$; начально-граничной задачей (2), (3)

$$q\left(t,x_1,x_2,x_3\right)\Big|_{x_3=x_3^0}=0,\ t>t_0, \quad (5)$$

в условиях уплотнения лёсса; и краевой задачей (2), (3)

$$\left\{K_{33}\frac{\partial q}{\partial x_3}+\varpi q\right\}\bigg|_{x_3=x_3^0}=\left\{\upsilon_s q\right\}\Big|_{x_3=x_3^0}, \quad (6)$$

в условиях, когда атомы газа частично отражены и частично поглощены. В формуле (3) $Q$ задаёт мощность сосредоточенного заряда или количество выброшенного зарядом атомов газа в момент времени $t_0$ в точке $(x_0,y_0,z_0)$; $\delta$ – единичная импульсная функция Дирака. В (6) $\upsilon_s$ – параметр, характеризующий величину общей скорости атомов газа в лёссе. Интенсивность потока газа, согласно равенству (6), реализуется через диффузионный поток

$$\left\{K_{33}\frac{\partial q}{\partial x_3}\right\}\bigg|_{x_3=x_3^0}$$

и гравитационный поток

$$\left\{\varpi q\right\}\Big|_{x_3=x_3^0}.$$

Представленные граничные условия (4)–(6), описывающие математическую модель рассматриваемой геологической системы, показывают соответственно:

- лёсс полностью отражает газ,
- лёсс полностью поглощает газ,
- частичное отражение и частичное поглощение лёссом газа.

При поверхностном выбросе $z$=0 средние значения плотности и концентрации лёсса при реализации глубинного взрыва сосредоточенным зарядом определяются из выражения

$$\frac{\partial q\left(t,x,y,z\right)}{\partial z}\bigg|_{z=0}=0;$$

в условиях полного поглощения газа окружающим его грунтом (реализуется уплотнение лёсса) определяются из выражения

$$q\left(t,x,y,0\right)=0.$$

Аналитические представления решений соответствующих начально-граничных задач в рамках рассматриваемой геологической системы при реализации глубинного взрыва сосредоточенным снарядом описываются равенствами:

$$q_1\left(t,x,y,z\right)=\frac{Q}{\left(2\pi\right)^{3/2}\sigma_x\sigma_y\sigma_z t^3}\times$$
$$\times\exp\left\{-\left(\frac{\left(x-\overline{U}t\right)^2}{2\sigma_x^2 t}+\frac{y^2}{2\sigma_y^2 t}\right)\right\}\times$$
$$\times\left[\exp\left\{-\frac{\left(z-H\right)^2}{2\sigma_z^2 t}\right\}+\exp\left\{-\frac{\left(z+H\right)^2}{2\sigma_z^2 t}\right\}\right], \quad (7)$$

$$q_2\left(t,x,y,z\right)=\frac{Q}{\left(2\pi\right)^{3/2}\sigma_x\sigma_y\sigma_z t^3}\times$$
$$\times\exp\left\{-\left(\frac{\left(x-\overline{U}t\right)^2}{2\sigma_x^2 t}+\frac{y^2}{2\sigma_y^2 t}\right)\right\}\times \quad (8)$$
$$\times\left[\exp\left\{-\frac{\left(z-H\right)^2}{2\sigma_z^2 t}\right\}-\exp\left\{-\frac{\left(z+H\right)^2}{2\sigma_z^2 t}\right\}\right],$$

где $\sigma_x^2(t)$, $\sigma_y^2(t)$, $\sigma_z^2(t)$ – дисперсионные координатные изменения атомов газа в момент времени t вдоль осей Ox, Oy, Oz, соответственно, являются непрерывными функциями аргумента $t$, $t\geq 0$.

Равенства (7) и (8) применяются для построения решений отдельных обратных задач при проведении математического моделирования (2)–(4); (2), (3), (5), описывающие глубинный грунтовый взрыв сосредоточенными зарядами с целью уплотнения лёссов, исключения их просадочных свойств.

Далее рассмотрим прикладные обратные задачи оценки глубины заложения сосредоточенных зарядов при математическом моделировании для снижения просадочных свойств лёссовых грунтов.

### Постановка обратных прикладных задач геологических систем

Пусть известны средние значения плотности $q_1(t,x,y,z)$ уплотнённого грунта после проведения глубинного взрыва сосредоточенным зарядом в условиях поверхностного выброса, или пусть известны средние значения плотности $q_2(t,x,y,z)$ уплотнённого грунта после проведения глубинного взрыва сосредоточенным зарядом в условиях полного поглощения газа окружающим его грунтом (реализуется уплотнение лёсса), а также по заданной мощности сосредоточенного заряда или количества выброшенного зарядом атомов газа $Q$ и известным $\sigma_x^2(t)$, $\sigma_y^2(t)$, $\sigma_z^2(t)$ дисперсионным координатным изменениям атомов газа в момент времени $t$ вдоль осей $Ox$, $Oy$, $Oz$ соответственно. Требуется оценить глубину заложения взрывчатого вещества $H$ с целью уплотнения лёссов глубинными сосредоточенными взрывами.

### Численное решение обратных задач

Реализуем построение численных решений поставленных выше обратных прикладных задач итерационным методом [18], в рамках математического моделирования геологических систем.

1. Численный подход решения прикладной задачи (в условиях полного отражения атомов газа реализуется поверхностный выброс) опирается на применении итерационного метода. Если каким-либо способом (графически или аналитически) отделён отрезок $[a, b]$ ($a$ и $b$ оценены, например, методом подбора), содержащий искомый корень $H$ уравнения

$$q_1(t,x,y,z) - \frac{Q}{(2\pi)^{3/2}\sigma_x\sigma_y\sigma_z t^3}\times$$
$$\times\exp\left\{-\left(\frac{\left(x-\overline{U}t\right)^2}{2\sigma_x^2 t}+\frac{y^2}{2\sigma_y^2 t}\right)\right\}\times$$
$$\times\left[\exp\left\{-\frac{(z-H)^2}{2\sigma_z^2 t}\right\}+\exp\left\{-\frac{(z+H)^2}{2\sigma_z^2 t}\right\}\right]=0,$$

то поведение геологической системы с характерными свойствами анизотропности (в условиях полного отражения атомов газа) представим в виде

$$H=\sigma_z\sqrt{-2t\times\ln\left(\begin{array}{l}\left(\dfrac{q_1(t,x,y,z)(2\pi)^{3/2}\sigma_x\sigma_y\sigma_z t^3}{Q}\right)\times\\ \times\exp\left(\dfrac{\left(x-\overline{U}t\right)^2}{2\sigma_x^2 t}+\dfrac{y^2}{2\sigma_y^2 t}\right)-\\ -\exp\left\{-\dfrac{(z-H)^2}{2\sigma_z^2 t}\right\}\end{array}\right)}-z.$$

Итерационный процесс численного решения задачи оценки глубины заложения взрывчатого вещества $H$ построим по следующей формуле последовательных приближений:

$$H^{(n+1)}=\sigma_z\sqrt{-2t\times\ln\left(\begin{array}{l}\left(\dfrac{q_1(t,x,y,z)(2\pi)^{3/2}\sigma_x\sigma_y\sigma_z t^3}{Q}\right)\times\\ \times\exp\left(\dfrac{\left(x-\overline{U}t\right)^2}{2\sigma_x^2 t}+\dfrac{y^2}{2\sigma_y^2 t}\right)-\\ -\exp\left\{-\dfrac{\left(z-H^{(n)}\right)^2}{2\sigma_z^2 t}\right\}\end{array}\right)}-z.$$

В предположении $\sigma_z=\sigma_y=\sigma_x$ поведение геологической системы с характерными свойствами изотропности [1, 19, 20] (в условиях полного отражения атомов газа) представим в виде

$$H=\sigma_z\sqrt{-2t\times\ln\left(\begin{array}{l}\left(\dfrac{q_1(t,x,y,z)(2\pi)^{3/2}\sigma_z^3 t^3}{Q}\right)\times\\ \times\exp\left(\dfrac{\left(x-\overline{U}t\right)^2+y^2}{2\sigma_z^2 t}\right)-\\ -\exp\left\{-\dfrac{(z-H)^2}{2\sigma_z^2 t}\right\}\end{array}\right)}-z.$$

Итерационный процесс численного решения задачи оценки глубины заложения взрывчатого вещества $H$ построим по следующей формуле последовательных приближений:

$$H^{(n+1)}=\sigma_z\sqrt{-2t\times\ln\left(\begin{array}{l}\left(\dfrac{q_1(t,x,y,z)(2\pi)^{3/2}\sigma_z^3 t^3}{Q}\right)\times\\ \times\exp\left(\dfrac{\left(x-\overline{U}t\right)^2+y^2}{2\sigma_z^2 t}\right)-\\ -\exp\left\{-\dfrac{\left(z-H^{(n)}\right)^2}{2\sigma_z^2 t}\right\}\end{array}\right)}-z.$$

Построение последовательности приближений начнём с начального значения $H^{(1)}$ (первый шаг итераций), которое может принимать произвольное значение из отделённого отрезка $[a, b]$.

Критерием остановки поиска приближённого решения задачи итерационным методом служит достижение желаемой погрешности вычислений $\varepsilon$ и задаётся неравенством

$$\left|H^{(n)}-H^{(n-1)}\right|<\varepsilon.$$

2. Численный подход решения прикладной задачи (в условиях полного поглощения газа реализуется

уплотнение лёсса) опирается на применении итерационного метода. Если каким-либо способом (графически или аналитически) отделён отрезок [*a*,*b*] (*a* и *b* оценены, например, методом подбора), содержащий искомый корень *H* уравнения

$$q_2(t,x,y,z)-\frac{Q}{(2\pi)^{3/2}\sigma_x\sigma_y\sigma_z t^3}\times$$
$$\times\exp\left\{-\left(\frac{\left(x-\overline{U}t\right)^2}{2\sigma_x^2 t}+\frac{y^2}{2\sigma_y^2 t}\right)\right\}\times$$
$$\times\left[\exp\left\{-\frac{(z-H)^2}{2\sigma_z^2 t}\right\}-\exp\left\{-\frac{(z+H)^2}{2\sigma_z^2 t}\right\}\right]=0,$$

то поведение геологической системы с характерными свойствами анизотропности (в условиях полного поглощения газа) представим в виде

$$H=\sigma_z\sqrt{-2t\times\ln\left(\begin{array}{l}\left(\frac{q_2(t,x,y,z)(2\pi)^{3/2}\sigma_x\sigma_y\sigma_z t^3}{Q}\right)\times\\ \times\exp\left(\frac{\left(x-\overline{U}t\right)^2}{2\sigma_x^2 t}+\frac{y^2}{2\sigma_y^2 t}\right)+\\ +\exp\left\{-\frac{(z-H)^2}{2\sigma_z^2 t}\right\}\end{array}\right)}-z.$$

Итерационный процесс численного решения задачи оценки глубины заложения взрывчатого вещества *H* построим по следующей формуле последовательных приближений:

$$H^{(n+1)}=\sigma_z\sqrt{-2t\times\ln\left(\begin{array}{l}\left(\frac{q_2(t,x,y,z)(2\pi)^{3/2}\sigma_x\sigma_y\sigma_z t^3}{Q}\right)\times\\ \times\exp\left(\frac{\left(x-\overline{U}t\right)^2}{2\sigma_x^2 t}+\frac{y^2}{2\sigma_y^2 t}\right)+\\ +\exp\left\{-\frac{\left(z-H^{(n)}\right)^2}{2\sigma_z^2 t}\right\}\end{array}\right)}-z.$$

Поведение геологической системы с характерными свойствами изотропности [1, 19, 20] (в условиях полного поглощения газа) в предположении $\sigma_z=\sigma_y=\sigma_x$, представим в виде

$$H=\sigma_z\sqrt{-2t\times\ln\left(\begin{array}{l}\left(\frac{q_2(t,x,y,z)(2\pi)^{3/2}\sigma_z^3 t^3}{Q}\right)\times\\ \times\exp\left(\frac{\left(x-\overline{U}t\right)^2+y^2}{2\sigma_z^2 t}\right)+\\ +\exp\left\{-\frac{(z-H)^2}{2\sigma_z^2 t}\right\}\end{array}\right)}-z. \quad (9)$$

Итерационный процесс численного решения задачи оценки глубины заложения взрывчатого вещества *H* построим по следующей формуле последовательных приближений:

$$H^{(n+1)}=\sigma_z\sqrt{-2t\times\ln\left(\begin{array}{l}\left(\frac{q_2(t,x,y,z)(2\pi)^{3/2}\sigma_z^3 t^3}{Q}\right)\times\\ \times\exp\left(\frac{\left(x-\overline{U}t\right)^2+y^2}{2\sigma_z^2 t}\right)+\\ +\exp\left\{-\frac{\left(z-H^{(n)}\right)^2}{2\sigma_z^2 t}\right\}\end{array}\right)}-z. \quad (10)$$

Построение последовательности приближений начнём с начального значения $H^{(1)}$ (первый шаг итераций), которое может принимать произвольное значение из отделённого отрезка [*a*, *b*].

Критерием остановки поиска приближённого решения задачи итерационным методом служит достижение желаемой погрешности вычислений $\varepsilon$ и задаётся неравенством

$$\left|H^{(n)}-H^{(n-1)}\right|<\varepsilon.$$

### Вычислительный эксперимент

Проведём вычислительной эксперимент для предлагаемых выше численных подходов решения обратных задач при математическом моделировании глубинного взрыва с целью исключения просадочности лёссов на объекте гражданского строительства.

Расчёты проведём с использованием экспериментальных данных, взятых из работы [1] и содержащих информацию о гидровзрывном уплотнении 20-метровой просадочной толщи на объекте «Общежитие на 203 места Прикумского завода пластмасс в 7-м микрорайоне». Показатели плотности и влажности грунта после проведения глубинного взрыва сосредоточенным зарядом приведены в табл. 1. $\vec{u}=0$ м/с – параметр горизонтального распространения газа (вектор, направленный вдоль оси абсцисс *Ox*). При $\sigma_z=\sigma_y=\sigma_x$ геологическая система обладает характерными свойствами изотропности. Уплотнение реализуется в условиях полного поглощения газа окружающим его грунтом. Масса заряда 5 кг (всего использовано на площадке 136 зарядов, расположенных по сетке 4×5 м). Взрывы производились интервалом в 5 секунд.

Оценим глубину заложения взрывчатого вещества *H* с точностью до $\varepsilon$=0,001.

Учитывая, что рассматриваемая геологическая система с характерными свойствами изотропности, решение задачи проведём по формуле (9). Дисперсионные координатные изменения атомов газа в момент времени *t* вдоль оси *Oz* определим по плотности скелета грунта (табл. 1) $\sigma_z\in(1{,}61;1{,}65)$.

Итерационный процесс численной оценки глубины заложения взрывчатого вещества *H* вычислим по

формуле последовательных приближений (10) с точностью до $\varepsilon$=0,001.

***Таблица 1.*** *Показатели плотности и влажности грунта [1]*

***Table 1.*** *Indicators of soil density and humidity [1]*

| Глубина, м<br>Depth, m | Влажность, %<br>Humidity, % | Плотность скелета, г/см$^3$<br>Skeleton density, g/cm$^3$ |
|---|---|---|
| 3,0 | 13,4 | 1,80 |
| 4,0 | 14,2 | 1,77 |
| 4,5 | 18,1 | 1,65 |
| 5,0 | 13,8…14,2 | 1,62…1,70 |
| 6,0 | 12,1…14,1 | 1,61…1,65 |
| 7,4 | 14,8…15,0 | 1,61…1,65 |
| 8,7 | 17,3…17,4 | 1,61…1,62 |
| 9,1 | 15,7…17,0 | 1,63…1,75 |
| 10,0 | 17,4 | 1,75 |
| 11,0 | 15,3…16,5 | 1,61…1,68 |
| 11,3 | 14,7 | 1,64 |

В табл. 2 представлены экспериментальные и вычисленные значения оценки глубины заложения сосредоточенного заряда в просадочный грунт.

***Таблица 2.*** *Экспериментальные и вычисленные значения оценки глубины заложения взрывчатого вещества H, м, на каждом шаге итерации*

***Table 2.*** *Experimental and calculated values for estimating the depth of the explosive H, m, at each iteration step*

| Номер итерации<br>Iteration number | *H*, м/m | |
|---|---|---|
| | экспериментальная<br>experimental | вычисленная<br>calculated |
| 1 | 6 | 6,1307 |
| 2 | | 6,0743 |
| 3 | | 6,0524 |
| 4 | | 6,0408 |
| 5 | | 6,0296 |
| 6 | | 6,0218 |
| 7 | | 6,0172 |
| 8 | | 6,0053 |
| 9 | | 6,0018 |
| 10 | | 6,0016 |

Критерием остановки поиска приближённого решения задачи итерационным методом послужило достижение желаемой погрешности вычислений $\varepsilon$

$$\left|H^{(10)} - H^{(9)}\right| < 0,001.$$

На рисунке представлены графические реализации экспериментальных и вычисленных значений оценки глубины заложения сосредоточенного заряда $H$ на каждом шаге построения последовательности итераций.

Проведённый вычислительный эксперимент продемонстрировал с точностью до $\varepsilon$=0,001 адекватность численных расчётов экспериментальным данным. Была получена оценка глубины заложения сосредоточенного заряда взрывчатого вещества $H$=6,0018≈6 м за девять итераций.

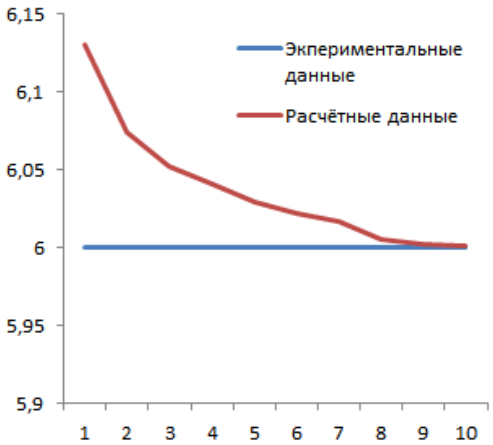



***Рисунок.*** *Экспериментальные (прямая) и вычисленные (ломанная) значения оценки глубины заложения сосредоточенного заряда H на каждом шаге итерации n*

***Figure.*** *Experimental (straight line) and calculated (broken) values of the estimate of the depth of the concentrated charge H at each iteration step n*

## Заключение

Проведение математического моделирования уплотнения просадочных грунтов глубинными взрывами неизбежно приводит к обратным прикладным задачам, решению которых посвящено настоящее исследование. В работе приведено построение численных решений обратных задач – оценка глубины заложения взрывчатого вещества в геологических системах с характерными свойствами анизотропности и изотропности.

Проведённый вычислительный эксперимент демонстрирует адекватность предлагаемого подхода оценки глубины заложения взрывчатого сосредоточенного заряда натурному уплотнению лёсса на объекте гражданского строительства. Получено численное решение обратной прикладной задачи с точностью до $\varepsilon$=0,001.

При проведении вычислительного эксперимента построенный итерационный процесс демонстрировал сходимость и приводил к решению задачи с различными начальным приближением и точностью. При этом наблюдалось существенное изменение вычислительной сложности решаемой задачи (количество итераций).

*Авторы выражают признательность профессору Борису Фёдоровичу Галаю за оказанную помощь при проведении данного научного исследования.*

## СПИСОК ЛИТЕРАТУРЫ

1. Галай Б.Ф. Уплотнение просадочных грунтов глубинными взрывами. – Ставрополь: Сервисшкола; СКФУ, 2015. – 240 с.
2. Галай Б.Ф. Пособие по уплотнению просадочных лессовых грунтов глубинными взрывами в условиях Северного Кавказа (изыскания, проектирование, производство работ)/ изд. 3-е, доп. – Ставрополь: Сервисшкола; СКФУ, 2016. – 142 с.
3. Свидерских А.В., Носков И.В. Анализ изменения характеристик лессовых грунтов в зависимости от пористости // Вестник Евразийской науки, 2019. – Т. 11. – № 2. URL: https://esj.today/PDF/76SAVN219.pdf (дата обращения 15.11.2021).
4. Ivanov P.L. Compaction of cohesionless soils by explosives // Proc. of the VI International Conference on Soil Mechanics and Foundation Engineering. – Monreal, 1966. – V. 3. – P. 352–354.

5. Amŝiejus J., Dirgėlienė N. Probabilistic assessment of soil shear strength parameters using triaxial test result // The Baltic Journal of Road and Bridge Engineering. – 2007. – V. 2. – № 3. – P. 125–131.
6. Интерпретация прочностных характеристик грунта для численных исследований / А.А. Петраков, А.Ю. Прокопов, Н.А. Петракова, М.Д. Панасюк // Известия Тульского государственного университета. Науки о Земле. – 2021. – № 1. – С. 225–236.
7. Пантюшина Е.В. Лёссовые грунты и инженерные методы устранения их просадочных свойств // Ползуновский вестник. – 2011. – № 1. – С. 127–130.
8. Hall C.E. Compacting a dam foundation by blasting // Journal of Soil Mechanics and Foundation Division. – 1962. – V. 88. – № SM3. – P. 31–51.
9. Liman A.K. Compaction of cohesionless foundation soils by explosives// Civil Engineering. – 1940. – V. 10. – Iss. 4. – P. 9–15.
10. Consolidation of organic subsoil's by applying underground explosions for formations of vertical sands drains and generating dynamic overloading / E. Dembicki, N. Kisielowa, R. Bona, R. Imiolek, A. Michowski, I. Semrau // Proc. 9 Int. Harbour Congress. – Antwerp, 1988. – P. 5.165–5.170.
11. Dembicki E. Dynamic consolidation of organic subsoil's by use of hidden underground explosions / E. Dembicki, N. Kisielowa, R. Bona, R. Imiolek, A. Michowski, I. Semrau // Proc. of the II Baltic Conf. S. M. F. E. – Tallinn, 1988. – P. 273–277.
12. Гридневский А.В., Прокопов А.Ю. Природно-техногенные условия формирования подтопления межбалочных пространств города Ростова-на-Дону // Известия Тульского государственного университета. Науки о Земле. – 2019. – № 2. – С. 26–37.
13. Способ уплотнения лёссовых грунтов в основании зданий и сооружений: пат. Рос. Федерация, № 2015247, заявл. 27.12.1991; опубл. 30.06.1994. Бюл. № 46. – 6 с.
14. Тарасенко Е.О., Тарасенко В.С., Гладков А.В. Математическое моделирование уплотнения просадочных лёссовых грунтов Северного Кавказа глубинными взрывами // Известия Томского политехнического университета. – 2019. – Т. 330. – № 11. – С. 94–101. DOI: 10.18799/24131830/2019/11/2352.
15. Математическое моделирование сосредоточенного глубинного взрыва на основе уравнения диффузии / Е.О. Тарасенко, А.В. Гладков, П.К. Корнеев, В.С. Тарасенко // Естественные науки – основа настоящего и фундамент для будущего: Материалы VI ежегодной научно-практической конференции Северо-Кавказского федерального университета «Университетская наука – региону». – Ставрополь: Изд-во Северо-Кавказского Федерального университета, 2018. – С. 66–68.
16. Тарасенко Е.О., Гладков А.В., Маликова Н.В. Разрешимость краевых задач, описывающих диффузию атомов пленки в подстилающей поверхности при образовании тонкопленочных структур // Известия Томского политехнического университета. Инжиниринг георесурсов. – 2016. – Т. 327. – № 2. – С. 125–132.
17. Денисов А.М. Введение в теорию обратных задач. – М.: Изд-во Московского государственного университета, 1994. – 208 с.
18. Вержбицкий В.М. Численные методы: (математический анализ и обыкновенные дифференциальные уравнения). – М.: Директ-Медиа, 2013. – 400 с.
19. Tsukamoto Y., Ishihara K. Analysis on settlement of soil deposits following liquefaction during earthquakes // Soils and Foundation. – 2010. – № 50 (3). – P. 399–441.
20. Ishihara K. New challenges in Geotechnique for ground hazards due to intensely strong earthquake shaking // Geotechnical, Geological and Earthquake Engineering. – 2009. – № 11. – P. 91–114.

*Поступила 01.12.2021 г.*

**Информация об авторах**

***Тарасенко Е.О.***, кандидат физико-математических наук, доцент, доцент кафедры вычислительной математики и кибернетики Факультета математики и компьютерных наук имени профессора Н.И. Червякова Северо-Кавказского федерального университета.

***Гладков А.В.***, старший преподаватель кафедры вычислительной математики и кибернетики Факультета математики и компьютерных наук имени профессора Н.И. Червякова Северо-Кавказского федерального университета.

UDC 51-74

# NUMERICAL SOLUTION OF INVERSE PROBLEMS IN MATHEMATICAL MODELING OF GEOLOGICAL SYSTEMS

**Elena O. Tarasenko**[1],
galail@mail.ru

**Andrey V. Gladkov**[1],
gavandrew@mail.ru

[1] North-Caucasian Federal university,
1, bld. 2, Pushkin street, Stavropol, 355009, Russia.

***The relevance of the research.*** *Mathematical modeling of geological systems is relevant both theoretically and practically. Inverse applied problems make it possible to systematize knowledge about the models under study. This article deals with the problem of assessing the depth of an explosive charge in collapsible soils in order to compact them and, as a consequence, reduce subsidence. This method of compaction is widely used at civil construction sites, relief features of the territories, etc. It should be noted as well that Russian territories are presented by loesses in about 17 % of cases.*
***The main aim*** *of the research is analytical and numerical modeling of the solution of inverse problems in geological systems when compacting loesses by deep explosions.*
***Methods:*** *iterative methods for solving problems, methods of computer modeling in the study of geological systems, conclusion statistics.*
***Results.*** *Analytical and numerical solutions of the considered inverse applied problem of the geological system are proposed. Solutions are described under the conditions of complete absorption of the gas formed as a result of the explosion of a concentrated charge by the surrounding collapsing soil (the loess is compacted) and the complete reflection of the gas from the soil (the release to the surface occurs). Various states of subsidence loess with characteristic properties of isotropy and anisotropy of the geological system have been studied in detail mathematically. A computational experiment was carried out to find an approximate iterative solution to the inverse problem for determining the depth of explosions in order to compact loess. The calculations were carried out taking into account the available experimental data on the example of a civil construction object in the North Caucasus.*
***Conclusions.*** *The studies carried out indicate the adequacy of the proposed approach for assessing the depth of the charge. The numerical solution of the problem is found with high accuracy and with minimal computational costs.*

***Key words:***
*Inverse problem, loess, compaction of subsident soils, mathematical modeling, numerical methods.*

*The authors express their gratitude to Professor Boris Fedorovich Galay for his assistance in conducting this scientific research.*

## REFERENCES

1. Galay B.F. *Uplotnenie prosadochnykh gruntov glubinnymi vzryvami* [Compaction of subsidence soils by deep explosions]. Stavropol, Servisshkola Publ., NCFU, 2015. 240 p.
2. Galay B.F. *Posobie po uplotneniyu prosadochnykh lessovykh gruntov glubinnymi vzryvami v usloviyakh Severnogo Kavkaza (izyskaniya, proektirovanie, proizvodstvo rabot)* [Manual on compaction of subsidence loess soils by deep explosions in the conditions of the North Caucasus (research, design, production of works)]. 3rd ed., add. Stavropol, Servisshkola Publ., NCFU, 2016. 142 p.
3. Sviderskikh A.V., Noskov I.V. Analysis of characteristics changes in the loess soils depending on porosity. *The Eurasian Scientific Journal*, 2019, vol. 11, no. 2. In Rus. Available at: https://esj.today/PDF/76SAVN219.pdf (accessed 15 November 2021).
4. Ivanov P.L. Compaction of cohesionless soils by explosives. *Proc. of the VI International Conference on Soil Mechanics and Foundation Engineering.* Monreal, 1966. Vol. 3, pp. 352–354.
5. Amŝiejus J., Dirgėlienė N. Probabilistic assessment of soil shear strength parameters using triaxial test result. *The Baltic Journal of Road and Bridge Engineering*, 2007, vol. 2, no. 3, pp. 125–131.
6. Petrakov A.A., Prokopov A.Yu., Petrakova N.A., Panasyuk M.D. Interpretation of soil strength characteristics for numerical studies. *Bulletin of the Tula State University. Science about Earth*, 2021, no. 1, pp. 225–236. In Rus.
7. Pantyushina E.V. Loess soils and engineering methods for eliminating their subsidence properties. *Polzunovsky vestnik*, 2011, no. 1, pp. 127–130. In Rus.
8. Hall C.E. Compacting a dam foundation by blasting. *Journal of Soil Mechanics and Foundation Division*, 1962, vol. 88, no. SM3, pp. 31–51.
9. Liman A.K. Compaction of cohesionless foundation soils by explosives. *Civil Engineering*, 1940, vol. 10, Iss. 4, pp. 9–15.
10. Dembicki E., Kisielowa N., Bona R., Imiolek R., Michowski A., Semrau I. Consolidation of organic subsoil's by applying underground explosions for formations of vertical sands drains and generating dynamic overloading. *Proc. 9 Int. Harbour Congress*. Antwerp, 1988. pp. 5.165–5.170.
11. Dembicki E., Kisielowa N., Bona R., Imiolek R., Michowski A., Semrau I. Dynamic consolidation of organic subsoil's by use of hidden underground explosions. *Proc. of the II Baltic Conf. S. M. F. E*. Tallinn, 1988. pp. 273–277.
12. Gridnevsky A.V., Prokopov A.Yu. Natural and technogenic conditions of the formation of flooding of the inter-girder spaces of the city of Rostov-on-Don. *Proceedings of the Tula State University. Earth Sciences*, 2019, no. 2, pp. 26–37. In Rus.
13. Osipov V.I., Filimonov S.D., Melnikov B.N., Kail E.V. *Sposob uplotneniya lyossovykh gruntov v osnovanii zdaniy i sooruzheniy* [Method of compaction of loess soils in the base of buildings and structures]. Patent RF, no. 2015247, 1994.
14. Tarasenko E.O., Tarasenko V.S., Gladkov A.V. Mathematical modeling of consolidation of subsidence loess soils of the North Caucasus by deep explosions. *Bulletin of the Tomsk Polytechnic University. Geo Assets Engineering*, 2019, vol. 330, no. 11, pp. 94–101. In Rus. DOI: 10.18799/24131830/2019/11/2352.
15. Tarasenko E.O., Gladkov A.V., Korneev P. K., Tarasenko V. S. Matematicheskoe modelirovanie sosredotochennogo glubinnogo vzryva na osnove uravneniya diffuzii [Mathematical modeling of a concentrated deep explosion based on the diffusion equation]. *Estestvennye nauki – osnova nastoyashchego i fundament dlya budushchego. Materialy VI ezhegodnoy nauchno-prakticheskoy konferentsii Severo-Kavkazskogo federalnogo universiteta «Universi-*

*tetskaya nauka – regionu»* [Natural sciences – the basis of the present and the foundation for the future. Materials of the VI Annual scientific and practical Conference of the North Caucasus Federal University «University Science – to the region»]. Stavropol, North Caucasus Federal University Publ. house, 2018. pp. 66–68.

16. Tarasenko E.O., Gladkov A.V., Malikova N.V. Solvability of boundary value problems describing the diffusion of film atoms in the underlying surface during the formation of thin-film structures. *Bulletin of the Tomsk Polytechnic University. Geo Assets Engineering*, 2016, vol. 327, no. 11, pp. 125–132. In Rus.
17. Denisov A.M. *Vvedenie v teoriyu obratnykh zadach* [Introduction to the theory of inverse problems]. Moscow, Moscow State University Press, 1994. 208 p.
18. Verzhbitsky V.M. *Chislennye metody: (matematicheskiy analiz i obyknovennye differentsialnye uravneniya)* [Numerical methods: (mathematical analysis and ordinary differential equations)]. Moscow, Direct-Media Publ., 2013. 400 p.
19. Tsukamoto Y., Ishihara K. Analysis on settlement of soil deposits following liquefaction during earthquakes. *Soils and Foundation*, 2010, no. 50 (3), pp. 399–441.
20. Ishihara K. New challenges in Geotechnique for ground hazards due to intensely strong earthquake shaking. *Geotechnical, Geological and Earthquake Engineering*, 2009, no. 11, pp. 91–114.

*Received: 1 December 2021.*

**Information about the authors**

***Elena O. Tarasenko***, Cand. Sc., assistant professor, North-Caucasian Federal University.

***Andrey V. Gladkov***, senior teacher, North-Caucasian Federal University.

УДК 621.315.211.9

# ОЦЕНКА СРОКА СЛУЖБЫ ИЗОЛЯЦИИ КАБЕЛЬНЫХ ИЗДЕЛИЙ ДЛЯ СИСТЕМ ПИТАНИЯ И УПРАВЛЕНИЯ ГОРНОШАХТНОГО ЭЛЕКТРООБОРУДОВАНИЯ

**Леонов Андрей Петрович**[1],
leonov_ap@tpu.ru

**Солдатенко Татьяна Михайловна**[1],
ruhtinatm@tpu.ru

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

***Актуальность*** *исследования обусловлена повышением требований к эксплуатационным свойствам гибких кабелей, применяемых в системах питания и управления горношахтного электрооборудования. Основным направлением, обеспечивающим улучшение свойств, является применение новых электроизоляционных материалов. На сегодняшний день шахтные кабели изготавливаются преимущественно с изоляцией из резины. Перспективным решением в плане совершенствования конструкций гибких шахтных кабелей является применение этиленпропиленовой резины, обладающей более высокой нагревостойкостью по сравнению с применяемыми резинами на основе хлоропренового и бутилкаучука. Повышение допустимой температуры нагрева токопроводящих жил позволит повысить передаваемую мощность, высокие значения тока термической устойчивости при коротком замыкании с обеспечением требуемой гибкости. Практическое применение кабелей нового типа в системах горношахтного электрооборудования невозможно без экспериментального подтверждения ресурсных характеристик. Отсутствие в технической литературе рекомендаций по проведению подобных испытаний определяет необходимость исследований, позволяющих прогнозировать срок службы гибких кабелей с учетом изменения физико-механических свойств этиленпропиленовой резины.*

***Цель:*** *разработать методику и определить срок службы гибких кабельных изделий с изоляцией из этиленпропиленовой резины для систем питания и управления горношахтного электрооборудования.*

***Объект:*** *гибкий шахтный кабель, изоляция, этиленпропиленовая резина, физико-механические свойства, энергия активации, срок службы.*

***Методы:*** *экспериментальные методы оценки физико-механических свойств и теплостойкости полимерных материалов; математические методы решения нелинейных систем уравнений и статистический анализ результатов испытаний.*

***Результаты.*** *Разработана методика определения срока службы кабелей с изоляцией из этиленпропиленовой резины, основанная на методе прогнозирования изменения физико-механических свойств с учетом энергии активации Еа процессов термической деструкции. Определен срок службы гибких шахтных кабелей с учетом температуры.*

***Ключевые слова:***
*Горношахтное электрооборудование, гибкие шахтные кабели, изоляция, этиленпропиленовая резина, тепловое старение, относительное удлинение при разрыве, энергия активации, срок службы.*

## Введение

Надежность эксплуатации горношахтного электрооборудования во многом определяется безаварийной работой кабельных систем питания и управления. В свою очередь надежность любого кабельного изделия главным образом зависит от электрической изоляции [1].

Электроснабжение оборудования в шахтах обеспечивается кабельными линиями силовых цепей от главной понижающей подстанции на поверхности, проложенных через ствол до центральной подземной подстанции, расположенной в околоствольном дворе, и далее до участковых подземных подстанций, размещенных непосредственно в забое. Работа электрических передвижных машин и механизмов от участковых подземных подстанций организована путем применения гибких кабельных линий. Электрический кабель в шахтах вследствие большой протяженности является наиболее уязвимым элементом электрооборудования, поэтому в обеспечении безопасности значительную роль играет соответствие кабеля условиям его эксплуатации. Конструкция кабеля в значительной степени определяет безотказную работу кабельной сети. Особенности эксплуатации электрических шахтных кабелей определяют основные причины выхода из строя, к которым в большей степени относятся повреждения, полученные в результате обвала горных пород – порезы и порывы наружной оболочки, сжатие и раздавливание кабелей в целом. К другому виду повреждений относятся раздавливание передвижными механизмами и машинами, а также порубы ручным инструментом, связанные в основном с человеческим фактором при недостаточной видимости в шахтах. Еще одной немаловажной причиной отказов являются внутренние дефекты, полученные в процессе изготовления или возникающие в результате эксплуатации. Это проявляется в виде разрушения отдельных элементов конструкции кабелей и в дальнейшем приводит к снижению электрического сопротивления токопроводящих жил и изоляции [2].

В системах питания и управления горношахтного электрооборудования применяются кабельные изделия двух типов: стационарные и гибкие. Стационарные кабели питают выработки и горизонты и предназначены для подключения стационарного силового оборудования или шахтных трансформаторов. Такие изделия всегда имеют в своей конструкции броню из стальных лент или проволок, медные жилы и основ-

ную изоляцию из резины или ПВХ-пластиката. Кабели с броней из стальных лент применяются при отсутствии растягивающих нагрузок в процессе эксплуатации и в случаях, когда необходима защита от механических воздействий. Кабели с броней из стальных оцинкованных проволок применяются в тех местах, где есть растягивающие нагрузки в процессе эксплуатации, смещение почвы, при вертикальной прокладке. Для питания подвижных потребителей – проходческих и очистных комбайнов, самоходных вагонов, погрузочно-доставочных машин и т. д., используются только гибкие кабели на номинальное напряжение до 1000 В. Гибкие кабели, по сравнению с бронированными, в процессе работы испытывают повышенные растягивающие, изгибающие и осевые нагрузки. Помимо этого, возможны внешние механические воздействия, связанные с обвалом горной породы, истиранием наружной оболочки об поверхность кусков добываемой породы и металлических элементов электротехнического оборудования. Все перечисленное приводит к опасному повреждению и отказу кабельной линии. В общем виде для обеспечения необходимого срока службы конструкция гибких шахтных кабелей должна соответствовать следующим требованиям [3]:

1) высокая прочность на разрыв и стойкость к истиранию оболочки;
2) высокая эластичность резиновой смеси для шланговой оболочки (относительное удлинение при разрыве ε должно составлять не менее 300 %);
3) большая гибкость конструкции кабеля в целом, облегчающая условия его эксплуатации;
4) применение профилированного резинового сердечника, вокруг которого скручиваются медные жилы, опрессованные слоем изоляции. Резиновый сердечник в этом случае является эластичной подушкой, воспринимающей и равномерно распределяющей наибольшее давление, которому подвергаются отдельные жилы при механическом воздействии на кабель;
5) высокая электрическая прочность изоляции;
6) наличие заземляющей и вспомогательных жил для дистанционного управления, изоляция которых должна иметь отличительную окраску;
7) наличие экранов вокруг каждой жилы или общего концентрического экрана вокруг всех жил, обеспечивающих автоматическое отключение кабеля от сети при повреждении кабеля и замыкании любой жилы на заземленный экран.

Большинство из перечисленных требований касаются изоляции и оболочки, что также подтверждает важность этих конструктивных элементов с точки зрения надежности.

Гибкие кабели в настоящее время выпускаются с изоляцией из резины на основе хлоропренового каучука, бутилкаучука и этиленпропиленового каучука. Основным преимуществом этих материалов является высокая эластичность, позволяющая при прокладке допускать меньшие радиусы изгибов.

Резины на основе хлоропренового каучука имеют более высокую озоностойкость, светостойкость, чем резины на основе натурального и бутадиен-стирольного каучука, отличную маслостойкость и обладают свойствами не распространять пламя при выносе кабеля из источников горения. Длительно допустимая рабочая температура этих резин на 10 °С выше, чем резин на основе натурального каучука. Существенный недостаток данного материала – небольшая механическая прочность при пониженных температурах [4].

Резины на основе бутилкаучука – продукт совместной полимеризации изобутилена с небольшим количеством изопрена в присутствии хлористого аммония или фтористого бора. Бутилкаучук обладает наименьшей газопроницаемостью и наибольшей влагостойкостью из всех применяемых каучуков. Резины на его основе обладают высоким сопротивлением тепловому старению и стойки к воздействию озона, кислот и щелочей. При этом ряд недостатков ограничивает применение бутилкаучука: плохая совместимость с другими каучуками, небольшая эластичность при обычных температурах, низкая скорость вулканизации, растворимость и набухание в алифатических углеводородах и нестойкость к воздействию минеральных масел [5].

Этиленпропиленовый каучук имеет линейную структуру, причем двойные связи в нем полностью отсутствуют. В резиновой смеси на основе этиленпропиленового каучука можно ввести большое количество наполнителей (свыше 100 мас. ч.) без ухудшения их характеристик, что положительно сказывается на себестоимости. Кроме того, высоконаполненные подобные смеси обладают хорошими технологическими свойствами. Этиленпропиленовый каучук обладает высоким электрическим сопротивлением, стойкостью к термомеханической деструкции, влагостойкостью, морозостойкостью. Кабели с изоляцией из этиленпропиленовой резины (ЭПР) имеют повышенную эластичность и гибкость. Это позволяет использовать такие кабели на участках сложной конфигурации с большим количеством ответвлений. Изоляция на основе этиленпропиленового каучука выдерживает длительно допустимую рабочую температуру до 90 °С. Помимо этого, появляется возможность избегать аварийных ситуаций при возгорании оборудования или коротком замыкании, так как температура плавления составляет 270 °С [6–8].

Анализ экспериментальных результатов [9–12] позволяет выделить ЭПР как перспективный материал изоляции низковольтных гибких кабелей. В то же время в технической литературе недостаточно информации об опыте применения ЭПР в качестве изоляции кабелей систем питания и управления горно-шахтного электрооборудования, отсутствуют рекомендации по оценке их ресурса. Практическое применение и серийное производство новых типов шахтных кабелей невозможно без проведения испытаний, подтверждающих требуемый уровень надежности. Разработка методики определения срока службы имеет большое научно-практическое значение, т. к. позволит спрогнозировать ресурс таких кабелей и выработать рекомендации по их применению с учетом специфики горнодобывающей отрасли.

### Методическая часть

При испытаниях гибких кабелей с резиновой изоляцией применяют ряд методов, позволяющих оценить [13, 14]:

- механические свойства (стойкость к многократным изгибам с осевым кручением, стойкость к раздавливающим нагрузкам, статическая гибкость);
- маслостойкость;
- озоностойкость;
- стойкость к внешним воздействующим факторам и т. д.

Полученные результаты показывают стойкость материала к тем или иным внешним воздействиям, но не дают возможности определить срок службы кабеля. В современной технической литературе также нет рекомендаций по критериям оценки срока службы.

В низковольтных кабелях уровень воздействующих напряжений ниже напряжения начала ионизации. Следовательно, отсутствуют частичные разряды, приводящие к электрическому старению изоляции. Основным фактором, определяющим старение и износ изоляции, является температура [15–17]. С учетом этого при создании методики ресурсных испытаний приняты рекомендации, изложенные в [18] и основанные на прогнозировании срока службы при тепловом старении с определением энергии активации $Ea$ процессов термической деструкции. Энергия активации – эмпирически определяемый параметр, характеризующий показательную зависимость константы скорости реакции от температуры. Повышение температуры приводит к увеличению скорости химических реакций, определяющих деградацию полимера, и ухудшению важнейших эксплуатационных характеристик.

При испытаниях электроизоляционных материалов в качестве контролируемой характеристики могут быть приняты: электрическая прочность, пробивное напряжение, удельное объемное электрическое сопротивление, тангенс угла диэлектрических потерь, прочность и относительное удлинение при разрыве и т. д. [19].

В общем виде изменение свойств полимерных материалов в процессе теплового старения описывается уравнением Аррениуса, которое устанавливает зависимость константы скорости протекания реакций термической деструкции $k$ от абсолютной температуры $T$:

$$lnk = -\frac{Ea}{RT} + \ln A,$$

где $T$ – абсолютная температура, К; $R$ – универсальная газовая постоянная, $\frac{\text{Дж}}{\text{моль·К}}$

На практике используют более удобный вид обобщенного уравнения теплового старения:

$$k = A \cdot \exp\left(-\frac{Ea}{RT}\right). \quad (1)$$

Выражение (1) является основой для проведения ускоренных испытаний на тепловое старение с определением степени изменения контролируемого параметра электроизоляционного материала.

### Проведение испытаний на тепловое старение лабораторных образцов

При ускоренных лабораторных испытаниях используется подход известный как «критерий конечной точки». В этом случае отказ воспринимается как достижение характеристикой некоторого фиксированного значения по отношению к исходному уровню. Испытания, как правило, проводятся циклически.

Фактором, ускоряющим проведение испытаний, является температура. Максимальное значение температуры теплового старения выбирается исходя из представления о неизменности механизма старения испытуемого образца. Такая температура не должна приводить к изменению форм и геометрических размеров образца, а также к процессам, не имеющим места при нормальных условиях эксплуатации, например, деструкция материала, или разложение. Остальные температуры выбирают ниже максимально допустимой температуры с шагом не менее 10 °С [20, 21]. С учетом общих представлений о термостойкости ЭПР [6] приняты следующие температуры старения: 115, 130 и 150 °С.

Для резин, применяемых в гибких шахтных кабелях, наиболее важной характеристикой является относительное удлинение при разрыве ε [19]. Оценочным критерием исчерпания ресурса этиленпропиленовой резины является уменьшение относительного удлинения до 50 % ($\varepsilon_{50\,\%}$) [20, 21].

При проведении испытаний используют испытательное оборудование и средства измерений: разрывная машин с погрешностью измерений ±0,5 %, климатическая камера тепла/термостат с погрешностью измерений ±3 °С, микрометр с погрешностью измерений ±0,01 мм. Термическое старение проводят либо на образцах кабельного изделия, либо на образцах в виде двусторонних лопаток. Количество образцов должно быть не менее 5 на каждую контрольную точку. Старение проводят согласно [22, 23].

Продолжительность теплового старения при каждой температуре не должна быть меньше, чем требуется для получения существенных изменений относительного удлинения. С учетом рекомендаций [20, 21] разработана программа испытаний, представленная в табл. 1.

***Таблица 1.*** *Продолжительность циклов испытаний с учетом температуры старения*

***Table 1.*** *Duration of test cycles taking into account the aging temperature*

| Температура старения *T*, °С<br>Aging temperature *T*, °С | Продолжительность теплового старения, ч<br>Thermal aging duration, h | | | | | | |
|---|---|---|---|---|---|---|---|
| 115 | 75 | 168 | 320 | 1488 | 2250 | 2660 | 4680 |
| 130 | 75 | 168 | 320 | 1090 | 1740 | 2290 | 2500 |
| 150 | 75 | 168 | 320 | 340 | 360 | 380 | 400 |

### Экспериментальная часть

В соответствии с принятой программой испытаний была проведена экспериментальная оценка изменения относительного удлинения при разрыве $\varepsilon$ образцов ЭПР (рис. 1). После каждой контрольной точки образцы вынимали, кондиционировали не менее 16 часов и проводили испытания на разрывной машине.

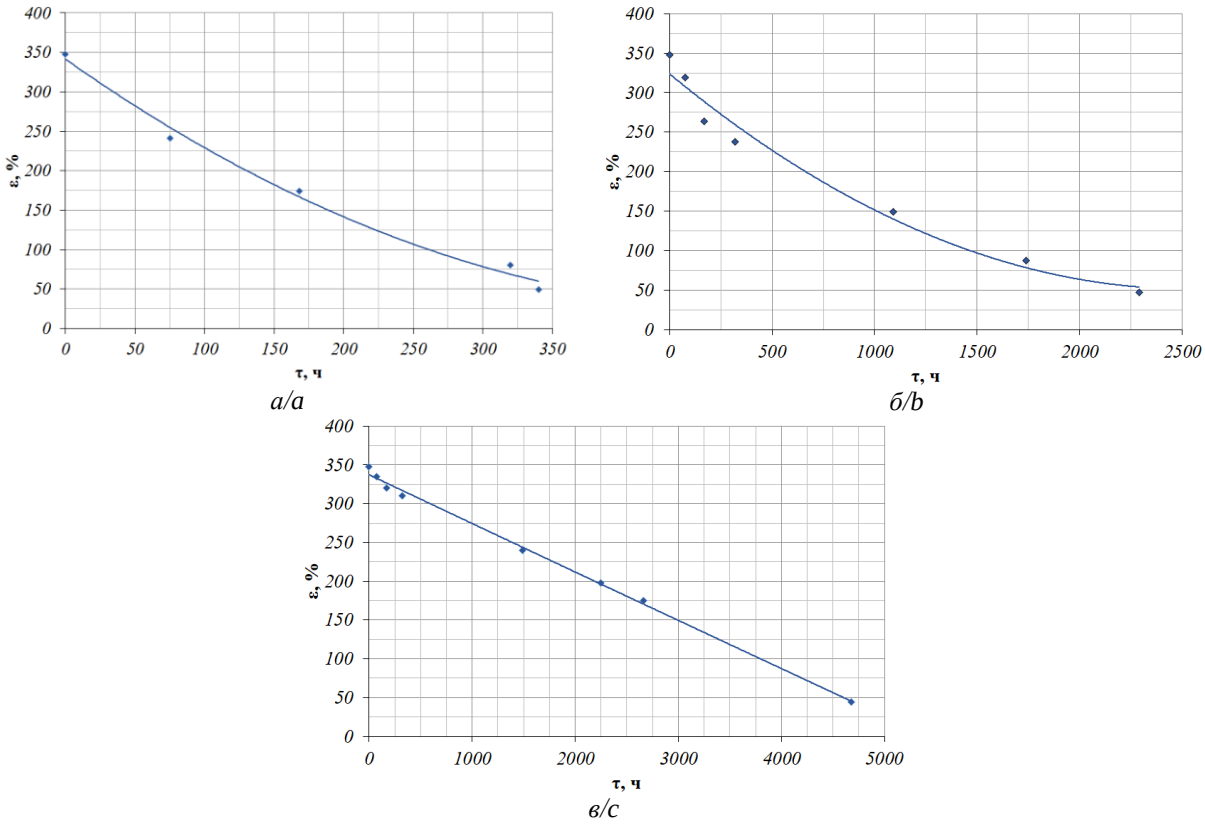



***Рис. 1.*** *Изменение относительного удлинения лабораторных образцов при температурах: а) 115; б) 130; в) 150 °С*
***Fig. 1.*** *Elongation changes of laboratory samples during the thermal aging at: a) 115; b) 130; c) 150 °C*

Результаты, приведенные на рис. 1, были обработаны методом наименьших квадратов. Установлено: изменение величины относительного удлинения при разрыве $\varepsilon$ с учетом температуры и продолжительности старения $\tau$ описывается обратным полином второй степени.

Уравнения полинома второй степени, описывающие изменение механических свойств образцов ЭПР в интервале исследованных температур, имеют вид:

$$\varepsilon_{115°C} = 0{,}0000001x^2 - 0{,}063x + 337{,}31,$$

$$\varepsilon_{130°C} = 0{,}00004x^2 - 0{,}2148x + 323{,}89,$$

$$\varepsilon_{150°C} = 0{,}0012x^2 - 1{,}2447x + 341{,}39.$$

Продолжительность старения до достижения предельного значения $\varepsilon_{50\%}$ с учетом температуры может быть определена экспериментальным путем по приведенной методике либо решением квадратного уравнения полинома второй степени.

Отечественные производители для новой продукции гибких кабелей нормируют минимальное значение относительного удлинения при разрыве не ниже 200 % [24]. С учетом этого определено время, при котором относительное удлинение изменяется в пределах от 200 до 50 %, характеризующее отказ изоляции (табл. 2).

***Таблица 2.*** *Длительность теплового старения образцов ЭПР с учетом степени изменения физико-механических свойств*
***Table 2.*** *Thermal aging duration of samples with ethylene propylene taking into account the ratio of change in physical and mechanical properties*

| Температура старения, *T* °C<br>Aging temperature, °C | Продолжительность старения *τ*, ч/Thermal aging duration, h | | | | |
|---|---|---|---|---|---|
| | Относительное удлинение/Elongation at break ε, % | | | | |
| | 200 | 150 | 100 | 70 | 50 |
| 150 | 129,849 | 187,747 | 258,215 | 311,711 | 356,9249 |
| 130 | 657,199 | 993,263 | 1415,364 | 1756,574 | 2083,356 |
| 115 | 2187,117 | 2987,34 | 3789,62 | 4271,98 | 4593,98 |

Полученные результаты временных интервалов, определяющие степень снижения механических свойств ЭПР, служат основой для определения срока службы при ускоренных испытаниях.

Срок службы при ускоренных испытаниях характеризуется построением линии регрессии, показывающей зависимость натурального логарифма времени $ln(\tau)$ достижения критического значения контролируемого параметра к обратной температуре $1/T$ (рис. 2).

Используя метод наименьших квадратов, получены уравнения линий регрессии в следующем виде:

$$\ln(\tau)_{200\%} = 13264\left(\frac{1}{T}\right) - 26{,}469, \quad (2)$$

$$\ln(\tau)_{150\%} = 13020\left(\frac{1}{T}\right) - 25{,}503, \quad (3)$$

$$\ln(\tau)_{100\%} = 12666\left(\frac{1}{T}\right) - 24{,}323, \quad (4)$$

$$\ln(\tau)_{70\%} = 12366\left(\frac{1}{T}\right) - 23{,}405, \quad (5)$$

$$\ln(\tau)_{50\%} = 12093\left(\frac{1}{T}\right) - 22{,}604. \quad (6)$$

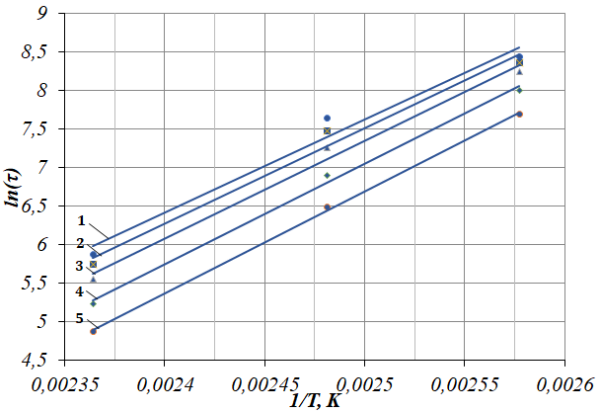



***Рис. 2.*** *Натуральный логарифм времени ln(τ) достижения критического значения ε к обратной температуре (1/T): 1 – $\varepsilon_{50\%}$, 2 – $\varepsilon_{70\%}$, 3 – $\varepsilon_{100\%}$, 4 – $\varepsilon_{150\%}$, 5 – $\varepsilon_{200\%}$*

***Fig. 2.*** *Natural logarithm of critical value epsilon reaching time ln(τ) as a function of reverse temperature: 1 – $\varepsilon_{50\%}$, 2 – $\varepsilon_{70\%}$, 3 – $\varepsilon_{100\%}$, 4 – $\varepsilon_{150\%}$, 5 – $\varepsilon_{200\%}$*

Прогнозирование ресурса электроизоляционных материалов при ускоренных испытаниях, основанное на уравнении Аррениуса, осуществляется с определением энергии активации процессов термической деструкции.

Энергия активации определяется графическим способом по тангенсу угла наклона *tgα* линии регрессии к оси абсцисс (2)–(6), (рис. 2):

$$Ea_i = R \cdot tg\alpha_i. \quad (7)$$

Результаты расчета энергии активации $Ea_i$ приведены в табл. 3.

***Таблица 3.*** *Энергия активации $Ea_i$ процесса разрушения образцов*

***Table 3.*** *Activation energy $Ea_i$ of samples destruction*

| Относительное удлинение<br>Elongation at break ε, % | 200 | 150 | 100 | 70 | 50 |
|---|---|---|---|---|---|
| Энергия активации E*a*, кДж/моль<br>Activation energy *Ea*, kJ/mol | 110,28 | 108,25 | 105,30 | 102,81 | 100,54 |

Для определения минимального срока службы принимаем меньшее значение энергии активации $Ea_{50\%} = 100{,}54\ \frac{\text{кДж}}{\text{моль}}$ и рассчитываем для него среднеквадратичное отклонение.

Среднеквадратичное стандартное отклонение $S_{tg\alpha}$ определяем по выражению [25]:

$$S_{tg\alpha} = \left[\frac{\sum_{i=1}^{i=n}\left(\delta_{yi}\right)^2}{(n-2)}\right]^{\frac{1}{2}}\left[\frac{\sum_{i=1}^{i=n} x_i^{\,2}}{n\cdot\sum_{i=1}^{i=n} x_i^{\,2} - \left(\sum_{i=1}^{i=n} x_i\right)^2}\right]^{\frac{1}{2}},$$

$$\delta_{yi} = y_i - (\text{tg}\alpha \cdot x_i + b),$$

где $x_i$ – *i*-е значение *x*; $y_i$ – *i*-е значение *y*; *n* – число измерений; *b* – действительное число из уравнения (3), *tgα* – тангенс угла наклона линии регрессии к оси абсцисс.

Таким образом, с учётом погрешности

$$Ea_{50\%} = 100{,}54 \pm 16{,}088\ \frac{\text{кДж}}{\text{моль}}. \quad (8)$$

Определение энергии активации *Ea* позволяет перейти к количественному расчету показателей надежности.

Уровень надежности низковольтных гибких шахтных кабелей характеризуется сроком службы. Срок службы – календарная продолжительность эксплуатации от начала эксплуатации объекта или ее возобновления после капитального ремонта до момента достижения предельного состояния. Продолжительность эксплуатации кабеля до его отказа характеризуется наработкой [26].

Срок службы изоляции сильно зависит от температуры старения и характеризуется нагревостойкостью. Нагревостойкость – способность электроизоляционного материала длительно выдерживать предельно допустимую температуру без признаков разрушения. Для данных кабелей с изоляцией из ЭПР принимается наработка на отказ 30000 часов [24]:

$$\ln(30000) = 10{,}31.$$

Используя полином второй степени (10), определяем длительно допустимую рабочую температуру кабеля с изоляцией из ЭПР:

$$12093\left(\frac{1}{T}\right) - 22{,}604 = 10{,}31,$$
$$T = 367{,}42\ \text{К},$$
$$t = 367{,}42 - 273 = 94{,}42\ °C.$$

Температурный индекс ЭПР составляет 90 °С.

Поскольку надежность гибких шахтных кабелей главным образом определяется надежностью полимерной изоляции, допускается использовать результаты ресурсных испытаний электроизоляционных материалов для оценки срока службы кабельных изделий.

Используя полученные результаты энергии активации $Ea_{50\%}$ (7), (8) и уравнение (1) определяем срок службы для реальных температур эксплуатации (*Ti*) [18]:

$$\tau_{Ti} = \tau_{\text{н}} \cdot e^{-\frac{1}{R}\cdot Ea_{50\%}\left(\frac{1}{\text{Тр}} - \frac{1}{\text{Тэ}}\right)},$$

где $\tau_{\text{н}}$ – заданная минимальная наработка, час; $T_p$ – длительно допустимая рабочая температура, °С; $T_э$ – температура эксплуатации, °С.

Результаты расчета срока службы приведены в табл. 4.

***Таблица 4.*** *Срок службы $\tau_{Ti}$ гибких шахтных кабелей в зависимости от температуры эксплуатации*

***Table 4.*** *Service life $\tau_{Ti}$ of flexible mining cables depending on the operating temperature*

| Температура эксплуатации<br>Operating temperature *T*, °C | 70 | 75 | 80 | 90 | 100 |
|---|---|---|---|---|---|
| Срок службы τ, год<br>Service life τ, year | 24,1 | 15,8 | 10,5 | 4,8 | 2,2 |

## Заключение

Проведена оценка нагревостойкости образцов ЭПР на основе метода прогнозирования изменения физико-механических свойств. Методика основана на обобщенном уравнении теплового старения в соответствии с уравнением Аррениуса. Определены эмпи-

рические уравнения, описывающие изменение относительного удлинения ε с учетом температуры *T*. Путем линейной аппроксимации результатов испытаний при тепловом старении рассчитана энергия активации *Ea* процессов термической деструкции исследованного полимера. С учетом оценки погрешности даны рекомендации по сроку службы гибких шахтных кабелей с изоляцией из этиленпропиленовой резины при рабочих температурах, соответствующих температурному индексу 90 °С. Данный подход может быть применён для оценки времени работоспособности полимерных электроизоляционных материалов в условиях пренебрежимо малого влияния электрического поля и внешних факторов на интенсивность процессов старения.

*Исследование выполнено в рамках сотрудничества между Национальным исследовательским Томским политехническим университетом и АО «Научно-исследовательский кабельный институт "НИКИ г. Томск"». Результаты исследования использованы для разработки новой редакции ГОСТ 24334-2020 «Кабели силовые для нестационарной прокладки. Общие технические условия».*

## СПИСОК ЛИТЕРАТУРЫ

1. Reliability evaluation of power cables considering the restoration characteristic / H.M. Nematia, A. Sant'Annaa, S. Nowaczyka, J.H. Jürgensenb, P. Hilberb // Electrical Power and Energy Systems. – 2019. – V. 105. – P. 622–631.
2. Wang J., Krstic M. Adaptive event-triggered PDE control for load-moving cable systems // Automatica. – 2021. – V. 129. – P. 109637–109657.
3. Красильников Г.В., Боев А.М., Бакиров А.Р. Разработка и внедрение безопасных кабелей в горнодобывающей промышленности // Горный информационно-аналитический бюллетень (научно-технический журнал). – 2011. – № 11. – С. 293–297.
4. Regulation effects of trans-1, 4-poly (isoprene-co-butadiene) copolymer on the processability, aggregation structure and properties of chloroprene rubber / Xin Zong, Shuo Wang, Ning Li, Hongyu Li, Xinping Zhang, Aihua He // Polymer. – 2021. – V. 213. – P. 12325–12332.
5. Dubey V., Pandey S.K., Rao N.B.S.N. Research trends in the degradation of butyl rubber // Journal of Analytical and Applied Pyrolysis. – 1995. – V. 34. – P. 111–125.
6. Жданов Ю.С., Попов О.А. Применение этиленпропиленовой резины в кабельной технике // Вестник ПНИПУ. Электротехника, информационные технологии, системы управления. – 2014. – № 10. – С. 70–78.
7. Алифанов Е.В., Чайкун А.М., Наумов И.С. Особенности рецептур резин на основе этиленпропиленовых каучуков и их применение в изделиях специального назначения // Авиационные материалы и технологии. – 2015. – № 2. – С. 51–55.
8. Lei Z., Li C., Men R. Mechanism of bulk charging behavior of ethylene propylene rubber subjected to surface charge accumulation // Journal of Applied Physics. – 2018. – V. 124. – P. 244103.
9. Useful lifetime prediction of rubber components using accelerated testing / Chang Su Woo, Sung Seen Choi, Seong Beom Lee, Hyun Sub Kim // IEEE Transactions on reliability. – 2010. – V. 59. – P. 11–17.
10. Mechanical aging trend in ethylene propylene rubber-insulated safety cables sampled from BWR nuclear power containment / N. Fuse, M. Kanegami, H. Misaka, H. Homma, T. Okamoto // IEEE Transactions on Dielectrics and Electrical Insulation. – 2014. – V. 21. – P. 571–581.
11. Breakdown performance and electrical aging life model of EPR used in coal mining cables / Yanwen Li, Muqin Tian, Zhipeng Lei, Jiancheng Song, Junxiang Zeng, Lingyan Lin, Yuanyuan Li // IEEE International Conference on High Voltage Engineering and Application (ICHVE). – Chengdu, China: Chongqing University and Southwest Jiaotong University and Mississippi State University, 2016. – P. 1–4.
12. Dielectric and mechanical behavior of thermally aged EPR/CPE cable materials / N. Bowler, S.W. Glass, S. Leonard, S. Fifield // IEEE Conference on Electrical Insulation and Dielectric Phenomena (CEIDP). – Mexico, 2018. – P. 11–17.
13. Degradation of mechanical and dielectric properties of flame-retardant ethylene propylene rubber by thermal aging / H. Yamaguchi, H. Ishii, N. Hirai and Y. Ohki // IEEJ Transactions on Electrical Electronic Engineering – 2020. – V.15. – P. 488–495.
14. Aging in EPDM used for outdoor insulation / Y. Xu, Y. He, F. Zeng, R. Zhang // IEEE Transactions on Dielectrics and Electrical Insulation – 1999. – V. 6. – P. 60–65.
15. Dielectric strength of ethylene propylene rubber under thermal and mechanical stress / Yang Liu, Rujia Men, Muqin Tian, Ye Wang, Kunying Han, Zhipeng Lei, Chuangyang Li // IEEE International Conference on High Voltage Engineering and Application (ICHVE). – China: Tsinghua University, 2020. – P. 135–138.
16. Cao L., Grzybowsk S. Life-time characteristics of EPR cable insulation under electrical and thermal stresses // IEEE International Conference on Solid Dielectrics (ICSD). – Italy: Department of Electrical Engineering of University, 2013. – P. 632–635.
17. Effect of thermal ageing on space charge in ethylene propylene rubber at DC voltage / R. Men, Z. Lei, J. Song, Y. Li, L. Lin, M. Tian, D. Fabiani, X. Xu// IEEE Transactions on Dielectrics and Electrical Insulation. – 2019. – V. 26. – P. 792–800.
18. ГОСТ Р 56722-2015. Пластмассы. Термогравиметрия полимеров. Ч. 2. Определение энергии активации. – М.: Стандартинформ, 2016. – 5 с.
19. Пешков И.Б. Материалы кабельного производства. – М.: Изд-во «Машиностроение», 2013. – 456 с.
20. ГОСТ 27710-88. Материалы электроизоляционные. Общие требования к методу испытаний на нагревостойкость. – М.: Издательство стандартов, 1989. – 55 с.
21. ГОСТ 10518-88. Системы электрической изоляции и другие полимерные системы. Общие требования к методам ускоренных испытаний на нагревостойкость. – М.: Издательство стандартов, 1988. – 30 с.
22. ГОСТ IEC 60811-501-2015. Кабели электрические и волоконно-оптические. Методы испытаний неметаллических материалов. Ч. 501. Механические испытания. Испытания для определения механических свойств композиций изоляции и оболочек. – М.: Стандартинформ, 2016. – 16 с.
23. ГОСТ IEC 60811-401-2015. Кабели электрические и волоконно-оптические. Методы испытаний неметаллических материалов. Ч. 401. Разные испытания. Методы теплового старения. Старение в термостате. – М.: Стандартинформ, 2015. – 14 с.
24. ТУ 16.К73.05-2021. Кабели силовые гибкие на напряжение 660 В. Технические условия. – Томск: НИКИ, 2021. – 55 с.
25. ГОСТ Р 57996-2017. Композиты полимерные. Дифференциальная сканирующая калориметрия. Определение энергии активации, предэкспоненциального множителя и порядка реакции. – М.: Стандартинформ, 2018. – 20 с.
26. ГОСТ 27.002-2015. Надежность в технике. Термины и определения. – М.: Стандартинформ, 2016. – 24 с.

*Поступила: 06.12.2021 г.*

### Информация об авторах

***Леонов А.П.***, кандидат технических наук, доцент отделения электроэнергетики и электротехники Инженерной школы энергетики Национального исследовательского Томского политехнического университета.

***Солдатенко Т.М.***, старший преподаватель отделения электроэнергетики и электротехники Инженерной школы энергетики Национального исследовательского Томского политехнического университета.

UDC 621.315.211.9

# EVALUATION OF INSULATION LIFETIME OF CABLES FOR POWER AND CONTROL SYSTEMS IN MINING ELECTRICAL EQUIPMENT

**Andrey P. Leonov**[1],
leonov_ap@tpu.ru

**Tatyana M. Soldatenko**[1],
ruhtinatm@tpu.ru

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

***The relevance*** *of the research is provided by flexible cables design perfection for power and control systems of mining electrical equipment. The application of modern insulation materials is the main way for improving flexible cables properties. Currently, mining cables are produced with the rubber insulation. Advanced solution for improving the design of flexible mining cable is application of ethylene-propylene rubber, which has a higher heat resistance as compered to chloroprene and butyl rubber. The transmitted power is increased and a high values of thermal stability current at a short current with the requiring cycle flexibility is provided. The practical application of brand-new cables in the mining electrical equipment is impossible without lifetime characteristics testing. The lack of recommendations in the technical literature on the methodology of such tests requires studies to predict the service life, taking into account changes in the physical and mechanical properties of the ethylene-propylene rubber.*
***The main aim*** *of the research is to develop the method and to determine the service life of flexible cables with ethylene-propylene rubber insulation for power and control systems of mining electrical equipment.*
***Objects:*** *flexible mining cable, insulation, ethylene-propylene rubber, physical and mechanical properties, activation energy, service life.*
***Methods:*** *experimental methods for evaluating the physical and mechanical properties, and heat resistance of polymeric materials; mathematical methods for solving nonlinear systems of equations and test results statistical analysis.*
***Results.*** *The method for determining the service life of cables with ethylene-propylene rubber insulation was developed. This method is based on the physical and mechanical properties prediction considering the activation energy of thermal destruction processes. The service life of flexible mine cables is determined taking into account temperature.*

***Key words:***
*Mining electrical equipment, flexible mining cables, insulation, ethylene-propylene rubber, thermal aging, elongation at break, activation energy, service life.*

*The research was carried out within the relationship of National Research Tomsk Polytechnic University and «Research cable institute "NIKI, Tomsk"». The results of the research were used for developing a new version of the SS 24334-2020 «Supply cables for unsteady layer. General technical conditions».*

## REFERENCES

1. Nematia H.M., Sant'Annaa A., Nowaczyka S., Jürgensenb J.H., Hilberb P. Reliability evaluation of power cables considering the restoration characteristic. *Electrical Power and Energy Systems*, 2019, vol. 105, pp. 622–631.
2. Wang J., Krstic M. Adaptive event-triggered PDE control for load-moving cable systems. *Automatica*, 2021, vol. 129, pp. 109637–109657.
3. Krasilnikov G.V., Boev A.M., Bakirov A.R. Development and introduction of safe cables in mining industry. *Gorny informatsionno-analiticheskiy byulleten*, 2011. no. 11, pp. 293–297. In Rus.
4. Xin Zong, Shuo Wang, Ning Li, Hongyu Li, Xinping Zhang, Aihua He. Regulation effects of trans-1, 4-poly (isoprene-co-butadiene) copolymer on the processability, aggregation structure and properties of chloroprene rubber. *Polymer*, 2021, vol. 213, pp.12325–12332.
5. Dubey V., Pandey S.K., Rao N.B.S.N. Research trends in the degradation of butyl rubber. *Journal of Analytical and Applied Pyrolysis*, 1995, vol. 34, pp. 111–125.
6. Zhdanov Yu.S., Popov O.A. Application of ethylene-propylene rubber in cable technology. *Herald Perm National Research Polytechnic University*, 2014, no. 10, pp. 70–78. In Rus.
7. Alifanov E.V., Chaykun A.M., Naumov I.S. Features of rubber formulas based on ethylen-propylene rubbers and their application in things of special purpose. *Scientific and Technical journal Aviation Materials and Technologies*, 2015, no. 2, pp. 51–55. In Rus.
8. Lei Z., Li C., Men R. Mechanism of bulk charging behavior of ethylene propylene rubber subjected to surface charge accumulation. *Journal of Applied Physics*, 2018, vol. 124, pp. 244103.
9. Chang Su Woo, Sung Seen Choi, Seong Beom Lee, Hyun Sub Kim. Useful lifetime prediction of rubber components using accelerated testing. *IEEE Transactions on reliability*, 2010, vol. 59, pp. 11–17.
10. Fuse N., Kanegami M., Misaka H., Homma H., Okamoto T. Mechanical aging trend in ethylene propylene rubber-insulated safety cables sampled from BWR nuclear power containment. IEEE Trans. *Dielectr. Electr. Insul*, 2014, vol. 21, pp. 571–581.
11. Yanwen Li, Muqin Tian, Zhipeng Lei, Jiancheng Song, Junxiang Zeng, Lingyan Lin, Yuanyuan Li. Breakdown performance and electrical aging life model of EPR used in coal mining cables. *IEEE International Conference on High Voltage Engineering and Application (ICHVE)*. Chengdu, China, Chongqing University and Southwest Jiaotong University and Mississippi State University, 2016. pp. 1–4.
12. Bowler N., Glass S.W., Leonard S., Sriraman Fifield A., S.W. Dielectric and mechanical behavior of thermally aged EPR/CPE cable materials. *IEEE Conference on Electrical Insulation and Dielectric Phenomena (CEIDP)*. Mexico, 2018. pp. 11–17.
13. Yamaguchi H., Ishii H., Hirai V., Ohki Y. Degradation of mechanical and dielectric properties of flame-retardant ethylene propylene rubber by thermal aging. *IEEJ Trans. Electr. Electron. Eng*, 2020, vol .15, pp. 488–495.
14. Xu Y., He Y., Zeng F., Zhang R. Aging in EPDM used for outdoor insulation. *IEEE Trans. DE*, 1999, vol. 6, pp. 60–65.
15. Yang Liu, Rujia Men, Muqin Tian, Ye Wang, Kunying Han, Zhipeng Lei, Chuangyang Li. Dielectric strength of ethylene propylene rubber under thermal and mechanical stress. *IEEE International Conference on High Voltage Engineering and Application (ICHVE)*. China, Tsinghua University, 2020. pp. 135–138.

16. Cao L., Grzybowsk S. Life-time characteristics of EPR cable insulation under electrical and thermal stresses. *IEEE International Conference on Solid Dielectrics (ICSD)*. Italy, Department of Electrical Engineering of University, 2013. pp. 632–635.
17. Men R., Lei Z., Song J., Li Y., Lin L., Tian M., Fabiani D., Xu X. Effect of thermal ageing on space charge in ethylene propylene rubber at DC voltage. *IEEE Trans. Dielectr. Electr. Insul*, 2019, vol. 26, pp. 792–800.
18. GOST P 56722. *Plastmassy. Termogravimetriya polimerov. Ch. 2. Opredelenie energii aktivatsii* [National Standard Plastics – Thermogravimetry (TG) of polymers – Part 2: Determinations of activation energy (MOD)]. Moscow, StandardInform Publ., 2016. 5 p.
19. Peshkov I.B. *Materialy kabelnogo proizvodstva* [Materials for cable production]. Moscow, Mashinostroenie Publ. house, 2013. 456 p.
20. GOST 27710-88. *Materialy elektroizolyatsionnye. Obshchie trebovaniya k metodu ispytaniy na nagrevostoykost* [SS 27710-88. Electrical insulating materials. General requirement for thermal endurance test method]. Moscow, Publishing house of standards, 1988. 55 p.
21. GOST 10518-88. *Sistemy elektricheskoy izolyatsii i drugie polimernye sistemy. Obshchie trebovaniya k metodam uskorennykh ispytaniy na nagrevostoykost* [SS 10518-88 Electric insulation systems and other polymer systems. General requirements for methods of accelerated tests for thermal endurance]. Moscow, Publishing house of standards, 1988. 30 p.
22. GOST IEC 60811-501-2015. *Kabeli elektricheskie i volokonno-opticheskie. Metody ispytaniy nemetallicheskikh materialov. Ch. 501. Mekhanicheskie ispytaniya. Ispytaniya dlya opredeleniya mekhanicheskikh svoystv kompozitsy izolyatsii i obolochek* [Interstate standard 60811-501-2015 Electric and optical fibre cables. Test methods for non-metallic materials. P. 501. Mechanical tests. Tests for determining the mechanical properties of insulating and sheathing compounds]. Moscow, StandardInform Publ., 2016. 16 p.
23. GOST IEC 60811-401-2015. *Kabeli elektricheskie i volokonno-opticheskie. Metody ispytaniy nemetallicheskih materialov. Ch. 401. Raznyye ispytaniya. Metody teplovogo stareniya. Starenie v termostate* [Interstate standard 60811-401-2015 Electric and optical fibre cables. Test methods for non-metallic materials. P. 401. Miscellaneous tests. Thermal ageing methods. Ageing in an air oven]. Moscow, StandardInform Publ., 2016. 14 p.
24. TU 16.K73.05-2021. *Kabeli silovye gibkie na napryazhenie 660 V. Tekhnicheskie usloviya* [Specifications 16.K73.05-2021 Flexible power cables for rated voltage of 660 V]. Tomsk, Scientific and Research, Design-Engineering and Technological Cable Institute Tomsk, NIKI, 2021. 55 p.
25. GOST R 57996-2017. *Kompozity polimernye. Differentsialnaya skaniruyushchaya kalorimetriya. Opredelenie energii aktivatsii, predeksponentsialnogo mnozhitelya i poryadka reaktsii* [National Standard 57996-2017 Polymer composites. Differential scanning calorimetry. Determination of activation energy, pre-exponential factor and reaction order]. Moscow, StandardInform Publ., 2018. 20 p.
26. GOST 27.002-2015. *Nadezhnost v tekhnike. Terminy i opredeleniya* [Interstate standard 27.002-2015 Dependability in technics. Terms and definitions]. Moscow, StandardInform Publ., 2016. 24 p.

*Received: 6 December 2021.*

**Information about the authors**

***Andrey P. Leonov***, Cand. Sc., associate professor, National Research Tomsk Polytechnic University.

***Tatyana M. Soldatenko***, senior lecturer, National Research Tomsk Polytechnic University.

UDC 550.46

# VOLATILITY OF CHEMICAL ELEMENTS DURING THE DEHYDRATION OF SECONDARY SULFATES

**Svetlana B. Bortnikova**[1],
BortnikivaSB@ipgg.sbras.ru

**Natalya A. Abrosimova**[1],
AbrosimovaNA@ipgg.sbras.ru

**Anna Yu. Devyatova**[1],
DevyatovaAY@ipgg.sbras.ru

**Elizaveta P. Shevko**[2],
Liza@igm.nsc.ru

**Nataliya V. Yurkevich**[1],
YurkevichNV@ipgg.sbras.ru

**Nikolay K. Cherny**[1],
wulfgar.nk@gmail.com

**Irina V. Danilenko**[2],
iv_danilenko@igm.nsc.ru

**Nadezhda A. Palchik**[2],
nadezhda@igm.nsc.ru

[1] Trofimuk Institute of Petroleum Geology and Geophysics of the Siberian Branch of the RAS,
3, Ac. Koptyug avenue, Novosibirsk, 630090, Russia.

[2] Sobolev Institute of Geology and Mineralogy of the Siberian Branch of the RAS,
3, Ac. Koptyug avenue, Novosibirsk, 630090, Russia.

***The relevance.*** *Air pollution due to the activities of the mining and metallurgical industries is a serious problem for the environment. This study was conducted to determine the possible mechanisms of migration and the sources of elements in the atmosphere above the surface of tailings.*
***The main aim*** *of the research is to show that chemical elements can be trapped by the water vapor and can migrate with the vapor phase during the desorption and dehydration of hydrous sulfates.*
***Object:*** *samples from the surface of the Belovo waste heaps (Belovo zinc processing plant, Belovo, Russia).*
***Methods.*** *Powder X-ray diffractometry (XRD) was used to determine the phase compositions of the crystalline substances, their quantitative phase relationships and transformations. An Agilent 8800 ICP-MS instrument (Tokyo, Japan), equipped with a MicroMist nebulizer, was used to determine the elements in the water samples (pore solution and condensates). Also, we used binocular microscope and physicochemical modeling methods.*
***Results.*** *By analyzing the condensates, it was determined that a wide range of chemical elements can migrate with vapor-gas streams from secondary hydrous sulfates under relatively low-temperature conditions (60 °C). Condensate from the wet sample contains high element concentrations due to the input of elements from the pore solution and hydrous sulfates. Alterations in mineral structure and water release are indicated by losses of sample weight. With dehydration, cations and trace elements can be extracted from the crystal lattice, replaced by protons, and can then enter the vapor-gas phase when the solution evaporates.*

***Key words:***
*Secondary sulfates, pore solution, condensates, mine tailings, volatility of chemical elements.*

## Introduction

Studies of air pollution due to the activities of the mining and metallurgical industries are aimed at the investigation of wind erosion of the surface of tailings [1–9], the composition of aerosol particles of different dimensions [10–13], nanoparticles [14] and sulfur dioxide emissions [2]. A detailed analysis of the sources, forms of migration of elements in aerosols, and the extent of atmospheric pollution in the territories under the influence of the mining industry is contained in the review of J. Csavina et al. [15].

Concerning the gas component of sulfide technogenic bodies, most attention has been paid to oxygen as an oxidizing agent [16–19]. The problem of low-temperature migration of gases and metals from anthropogenic sources, particularly sulfide tailings, is poorly studied and discussed in the literature. Mainly, studies have investigated the gas transport of mercury [20–23], radon and thoron [24], as well as the production of greenhouse and sulfur-containing gases [25]. A small number of studies have focused on the emission of sulfur gases and metalloids, such as antimony, tellurium, arsenic and bismuth [26–29]. The transfer of metals from tailings in the vapor-gas phase has been the focus of some works [30, 31].

Our previous work established that air streams over sulfide tailings are complex mixtures of sulfur-containing gases: sulfur dioxide, dimethyl sulfide, dimethyl selenide, carbon disulfide and others. Anomalies of these gases in the air above the sulfide tailings were detected by direct measurements using a portable gas analyzer GANK-4 and the gas chromato/mass spectrometer MCMS «NAVAL» after field gas collection on the sorbent [31–33]. In addition, inorganic components, including rock-forming elements (Ca, Mg, Na, K, Si, Fe, Al, and Mn), metals (Cu, Zn, Pb, Ni, and Sn), and metalloids (As, Te, and Sb), can migrate in a vapor-gas stream under ambient conditions. The elemental composition of low-temperature gas flows was determined by collecting condensates in situ using a special experimental setup with a Peltier refrigerator [34]. During laboratory experiments, we determined that chemical elements can be transferred by vapor-gas streams from both solutions and dry solid tailings. When the vapor separates from the solutions, the mobility of the elements depends on their chemical species. The potential for element migration in the vapor phase is determined by the percentage of hydrated ions; thus, as the proportion of aqua ions increases, the mobility of the element also in-

creases. Furthermore, elements in complexes accumulate in the salt residue.

The concentrations of elements in condensates from solids increased depending on the oxidation state of the tailings matter, and there is a direct correlation with the amount of water-soluble species of elements [34]. It was shown that secondary sulfates forming on tailings surfaces can be a significant source of chemical elements because of their volatilization and transport by vapor-gas flows [34–36]. The investigation of sulfates and hydrated sulfate minerals plays a key role in the interpretation of the hydrochemical history of anthropogenic toxic tailings (and rock dumps) [36–41].

To understand the mechanism of element migration from sulfates, a determination of the composition of the vapor-gas mixture that separates from sulfates and a detailed study of the changes in some sulfates under slight heating were performed.

#### Materials and methods

For experiments with individual fractions of sulfates, the efflorescence samples were collected from the surface of the Belovo waste heaps (Belovo zinc processing plant, Belovo, Russia). The waste material of the plant is clinker, which is a product of pyrometallurgical smelting. The plant extracted Zn from a sphalerite concentrate, which was obtained from a polymetallic sulfide deposit mined in the Salair ore field. The mineralogy and internal structure of the Belovo waste heaps are described in detail in previous works [32, 42, 43]. Clinker is a loose, coarse-grained material resembling slag. It consists primarily of silicate glass with the inclusion of potassium feldspar, olivine, spinel, alloys and some amount of sulfides. Due to impurities in the original sphalerite concentrate, the clinker contains high levels of metals: up to 15 % of Zn, 8,5 % of Cu, 0,7 % of Pb and other metals and metalloids. A large amount of fine-grained coke breeze occurs in the waste material, which leads to spontaneous combustion in the inner part of the heaps [32, 39]. Due to the high amount of remaining metals and the intensive transformation of the slags under the influence of oxidizing agents, intensified by combustion, abundant efflorescence consisting of sulfates of Fe, Cu, and Zn was formed on the surface.

#### Field sampling

During fieldwork under hot, dry weather conditions, efflorescence samples were collected from the surface of the waste heaps (Fig. 1). A bulk sample consisting of intergrowths of sulfates was collected from a lens formed in clinker material. The sample was kept tightly packed in polyethylene bags to prevent contact with air and the evaporation of pore waters. Individual sulfates were taken from encrustation at the lens boundary and placed in sealed plastic containers.

***Fig. 1.*** *Photograph of secondary sulfates on the heap surface*

***Рис. 1.*** *Фотография линзы сульфатов на поверхности отвала*

#### Laboratory experiments and analyses

The bulk sample was divided into two sets (Fig. 2). The first set was intended for pore solution squeezing and determination of liquid composition. The pore solution was squeezed from 0,5 L of the bulk sample using a laboratory press at pressure of 100 kPa. The second part of the sample was stored in a sealed package in a refrigerator before the experiment. The experiments were conducted on a dry sample consisting of a mixture of various sulfate minerals and on a wet sample containing a liquid phase in addition to sulfates.

To obtain condensates, 100 g of the bulk samples (before and after pore water squeezing) were placed in a heat-resistant beaker covered with a funnel that was connected to the bubbler inlet with a silicone hose (Fig. 2). An air-gas mixture was pumped out of the ice-cooled bubbler through an exit port by means of a back-pressure pump (pumping speed ~2,4 l/min). The beaker was heated to a temperature of 60 °C on the digital magnetic stirrer, and the condensates were dropped into the bubbler.

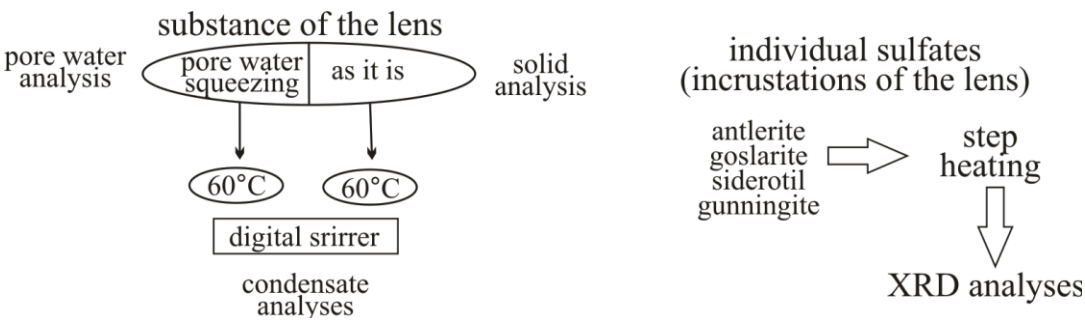



***Fig. 2.*** *Scheme of the laboratory experiments and analyses*

***Рис. 2.*** *Схема лабораторных экспериментов и анализов*

The contents of silicate group oxides in the bulk sample of the lens were determined *via* X-ray fluorescence analysis from a 3 g sample aliquot (IGM SB RAS, Laboratory of X-ray Spectral Analysis Methods). The elemental composition of the lens material was determined by energy-dispersive X-ray fluorescence analysis using synchrotron radiation (XRF-SR) at the Siberian Center for Synchrotron and Terahertz Radiation of the Center for Collective Use «SCSTI» at the INP SB RAS at the station of local and scanning X-ray fluorescence elemental analysis «Complex VEPP-4–VEPP-2000» [44].

An Agilent 8800 ICP-MS instrument (Tokyo, Japan), equipped with a MicroMist nebulizer, was used to determine the elements in the water samples (pore solution and condensates, NIIC SB RAS, Analytical Laboratory). High-purity Ar (99,95 %) was used as the plasma-forming, transporting, and cooling gas. A solution of 7Li, 59Co, 89Y, and 205Tl in 2 % nitric acid, with a concentration of 1 g/L for each determined element (Tuning Solution, USA), was used for the adjustment. All measurements were conducted in three replicates (n=3) for each element. The relative standard deviation did not exceed 13 % in all measurements.

Initially, a collection of samples, different in color and morphology, was set up for the study of individual sulfates (Fig. 3). Then, uniform grains were separated from each of the samples, neatly crushed in an agate mortar to a fraction of 0,1–0,25 mm and sorted by hand picking under a binocular microscope to achieve monomineral samples to the extent possible. Final samples were prepared for experiments as follows.

100 mg of each sample was abraded in an agate mortar into a powder with a particle size of approximately 10 μm with the addition of ethanol to preserve the structure. Then, the sample was applied to a glass substrate 25×25 mm in size with an even thick layer at the rate of 25 mg per 1 $cm^2$ of the substrate so that the layer thickness allowed us to analyze the sample directly, not the substrate. X-ray phase analysis was carried out after drying the powder at room temperature.

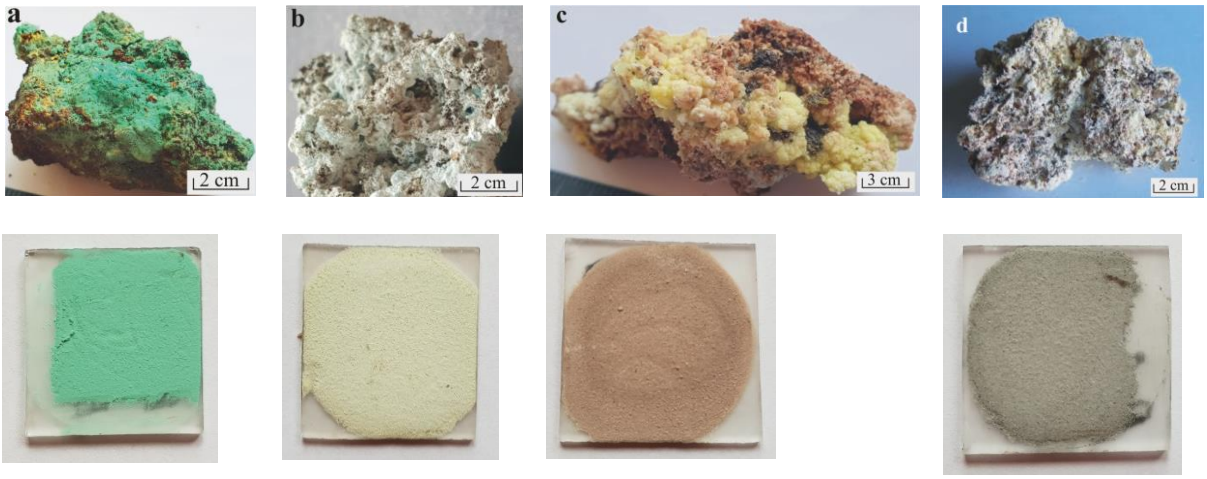



***Fig. 3.*** *Photographs of the studied sulfates: a) antlerite (BS-1); b) goslarite (BS-2); c) siderotil (BS-5); d) gunningite (BS-6), and prepared samples for XRD*

***Рис. 3.*** *Фотографии исследуемых сульфатов: a) антлерит (BS-1); b) госларит (BS-2); c) сидеротил (BS-5); d) ганнингит (BS-6), и приготовленные препараты для РСТА*

Each sample was heated on a digital magnetic stirrer WiseStir MSH-20D-Set (DAIHAN Scientific) at a temperature interval of 40–60°C for 1 h for each 10 °C step under ambient air conditions. Before the experiments and after each heating step, the samples were weighed and measured. Powder X-ray diffractometry (XRD) was used to determine the phase compositions of the crystalline substances, their quantitative phase relationships and transformations. The XRD studies were performed on an ARL X'TRA powder diffractometer (Thermo Fisher Scientific, Ecublens, SARL, Switzerland) using CuK radiation, a voltage of 40 kV, and a current of 25 mA. The diffraction patterns were scanned at 2Θ intervals from 2 to 65° in steps of 0,02, and the analysis speed was 4 per minute.

### Physicochemical modeling

To describe the chemistry of the interaction in the pore solution, equilibria were calculated in the temperature range from 20 to 60 °C with a step of 5 °C. In the calculations, the software package «Selector» with a built-in thermodynamic database [45, 46] was used [47]. For each temperature step, we determined the dissolved species of all discussed elements and solid phases that could be formed in the solution under specified conditions. Thus, the features of the element behavior in the pore solution were determined, and the processes of precipitation/dissolution of the forming phases with increasing temperature were quantitatively described.

## Results

### Chemical and mineralogical composition of the bulk sample

The chemical composition of the lens material is dominated by Cu, Zn and Fe, which are the main mineral-forming elements (Table 1). Sulfur accounts for almost 40 %. In addition to these elements, rather high concentrations of Ni, Co, and As are determined in the lens material. Rock-forming components (Si, Al, Ca, Mn, etc.) are in small amounts.

***Table 1.*** *Chemical composition of the lens*
***Таблица 1.*** *Химический состав линзы*

| Elements Элементы | % | Elements Элементы | ppm г/т |
|---|---|---|---|
| $SiO_2$ | 2,3 | Ni | 2540 |
| $Al_2O_3$ | 0,34 | Co | 1850 |
| $TiO_2$ | 0,11 | Pb | 36 |
| CaO | 1,1 | Ag | 13 |
| MnO | 0,42 | Cd | 2,7 |
| MgO | 0,22 | As | 3200 |
| $K_2O$ | 0,51 | Sb | 31 |
| $Na_2O$ | 0,42 | Te | 1,3 |
| BaO | 0,64 | Sr | 38 |
| Fe | 10 | Y | 17 |
| Cu | 20 | Zr | 13 |
| Zn | 19 | Mo | 4,4 |
| S | 39 | Sn | 2,8 |

The mineral composition of the lens is a mixture of different sulfates of Ca, Cu, Zn, Fe, Mg, K, and Na (Table 2). The major minerals are aqueous sulfates that contain a different number of water molecules: chalcantite, goslarite, sideronatrite, starkeyite, siderotil, gunningite, and hydroxo-sulfate antlerite. Other crystalline hydrates of the same elements are present in smaller amounts. Traces of melanterite, dolerophanite, and lead and copper arsenate thometrekite were identified.

### The composition of the pore solution and results of physicochemical modeling

The pore solution squeezed from the bulk sample is a highly mineralized acidic sulfate Cu-Zn brine with high concentrations of Na, Fe, and Mg and total dissolved solids greater than 300 g/L. The main trace elements are Mn and As (Table 3). The high element concentrations in the pore water are the result of sulfide oxidation and sulfate dissolution in the waste material.

***Table 2.*** *Mineral composition of the lens*
***Таблица 2.*** *Минеральный состав линзы*

| Major/Основные | | Minor/Второстепенные | | Trace/Следы (<<1 %) | |
|---|---|---|---|---|---|
| Antlerite Антлерит | $Cu_3(SO_4)(OH)_4$ ~40±5 % | Mirabilite Мирабилит | $Na_2SO_4\times10H_2O$ ≈2±0,3 % | Melanterite Мелантерит | $FeSO_4\times7H_2O$ |
| Goslarite Госларит | $Zn(SO_4)\times7H_2O$ ~20±5 % | Moorhouseite Мурхаузит | $(Co, Ni, Mn)SO_4\times6H_2O$ ≈1±0,1 % | Dolerophanite Долерофанит | $Cu_2O(SO_4)$ |
| Gunningite Ганнингит | $ZnSO_4\times H_2O$ ~15±2 % | Gypsum Гипс | $CaSO_4\times2H_2O$ ≈1±0,1 % | Thometrekite Тометрекит | $PbCu_2(AsO_4)_2\times2H_2O$ |
| Siderotil Сидеротил | $Fe(SO_4)\times5H_2O$ ~10±2 % | Bianchite Бианхит | $(Zn, Fe)SO_4\times6H_2O$ ≈1±0,1 % | | |
| Starkeyite Старкиит | $MgSO_4\times4H_2O$ ~3±0,5 % | Cyanocroite Цианокроит | $K_2Cu(SO_4)_2\times6H_2O$ ≈0,4±0,1 % | | |
| Sideronatrite Сидеронатрит | $Na_2Fe(SO_4)_2(OH)\times3H_2O$ ~2±0,3 % | | | | |

*Note/Примечание: * – approximate content in the sample/приблизительное содержание в образце.*

***Table 3.*** *Element concentrations in the pore solution, mg/L*
***Таблица 3.*** *Концентрации элементов в поровом растворе, мг/л*

| Elements Элементы | Content Содержание | Elements Элементы | Content Содержание |
|---|---|---|---|
| $SO_4^{2-}$* | 187 | Si | 29 |
| Ca | 360 | Cd | 19 |
| Mg* | 8,6 | Cr | 16 |
| Na* | 15 | Co | 82 |
| K | 23 | As | 870 |
| Fe* | 13 | Sb | 14 |
| Mn | 970 | Ba | 0.46 |
| Al* | 1,2 | Sr | 1,8 |
| Cu* | 29 | Ti | 3,6 |
| Zn* | 47 | V | 3,8 |

** – elements in g/L/элементы в г/л.*

The calculation of equilibria in a solution with this composition using physicochemical modeling was carried out to describe the chemistry of the element behavior in the experiments. The results indicate the complexity of redistribution of elements between the true solution and the resulting solid phases during heating. In the temperature range under discussion, the elements Mg, Mn, Na, Cd, Al, and Co were completely in solution (Fig. 4). However, their species were different. Mg and Mn were in two main forms: $Me^{2+}$ and $MeSO_4$ (aq); the sulfate complex was predominant, and the aqua ion form was 3–9 % of the total content. The forms of Na are almost evenly distributed between the anionic sulfate complex $MeSO_4$ and the $Me^+$ aqua ions. Cadmium and cobalt are almost entirely in the form of aqua ions: $Cd^{2+}$ and $Co^{2+}$. Arsenic in solution is present in the form of meta-arsenous acid ($HAsO_2$), a highly toxic compound of As(III). Vanadium forms the vanadil-ion $VO^{2+}$.

In contrast to the described elements, Ca, Sr, and the metals Cu, Zn, and Fe in the pore solution can form a solid suspension, and their amount in the true dissolved form changes with increasing temperature. The percentage of dissolved Ca decreases from 28 to 15 % with increasing temperature from 20 to 60 °C (Fig. 5), and an anhydrite suspension may be formed. Thus, a major amount of dissolved Ca (97 %) forms a neutral sulfate complex, and only 3 % is in the form of aqua ions. The percentage of dissolved Sr as a whole decreases from 61 to 26 %, although in the range of 20–45 °C the solubility of its compounds increases, reaching a maximum at 45 °C, but then it goes into suspension in the form of celestine with increasing temperature and remains completely in solution in aqua-ionic form. Cu, Zn, and Fe at 20 °C actively interact with $SO_4^{2-}$, forming a suspension of sulfates (chalcanthite, goslarite, and melanterite) at the beginning of heating, which then is dissolved at 50–60 °C, and the metals are released into solution as aqua-ionic species (Fig. 5). Antimony is precipitated in the form of servantite ($Sb_2O_4$), and no more than 1,5 % of the total content in solution is in the form of meta-antimony acid.

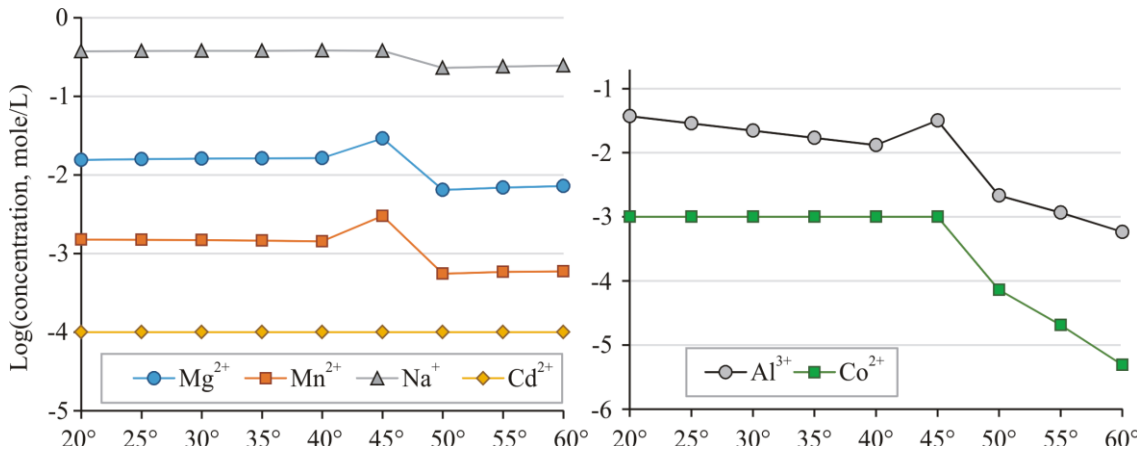



***Fig. 4.*** *Concentration of element aqua-ions in the pore solution when heating*

***Рис. 4.*** *Концентрация аква-ионных форм в поровом растворе при нагревании*

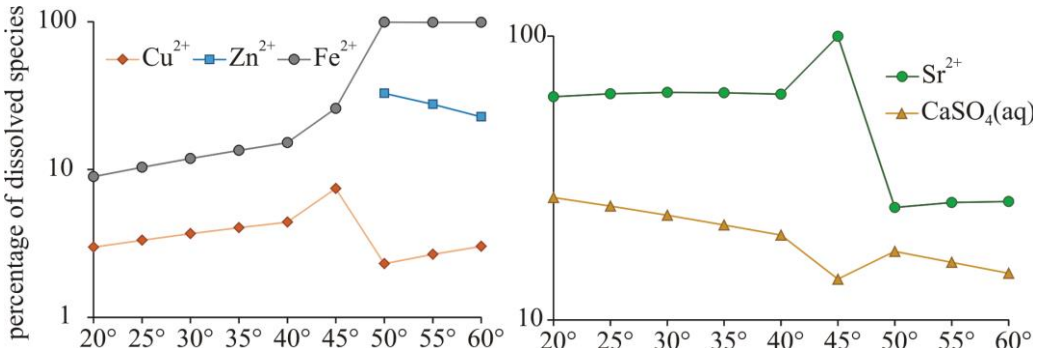



***Fig. 5.*** *Changes in the dissolved forms of elements with increasing temperature*

***Рис. 5.*** *Изменение растворенных форм элементов с увеличением температуры*

### Composition of condensates

The obtained condensates from both wet (before pore water squeezing – BL-1) and dry (after squeezing – BL-2) samples contain a wide range of elements (Table 4).

***Table 4.*** *Element concentrations in condensates, Ca–Sr in mg/L; Al–Li in μg/L*

***Таблица 4.*** *Концентрации элементов в конденсатах, Ca–Sr в мг/л; Al–Li в μг/л*

| | BL-1 | BL-2 | | BL-1 | BL-2 |
|---|---|---|---|---|---|
| Ca | 1,8 | 1,1 | Al | 5,2 | 4,6 |
| Mg | 0,39 | 0,16 | Cd | 1,6 | 3,0 |
| Na | 0,25 | 0,18 | Cr | 0,19 | 1,9 |
| K | 0,30 | 0,25 | Co | 0,58 | 0,50 |
| Fe | 0,013 | <0,005 | Ag | 0,052 | 0,021 |
| Mn | 0,034 | 0,034 | As | 10 | 7,9 |
| Si | 0,45 | 0,38 | Sb | 0,092 | 0,025 |
| Cu | 0,089 | 0,030 | Rb | 0,65 | 0,76 |
| Zn | 0,11 | 0,023 | Ti | 0,31 | 0,29 |
| Ba | 0,0077 | 0,0048 | V | <0,3 | 0,74 |
| Sr | 0,011 | 0,0072 | Li | 0,38 | 0,36 |

Calcium is the major cation, and Mg, Na, Si, and K are less abundant. Among the metals, the highest concentrations are found for Zn and Cu as mineral-forming elements. At the same time, the concentration of iron is much lower than we would expect. The concentration of iron is below the detection limit in the condensate from the dry sample, although the sample contains hydrous ferrous minerals, i. e. sideronatrite and siderotil, and iron is present as an impurity in all other sulfates. The low volatility of iron in comparison with other metals was noted previously [31, 32]. Trace elements, such as Ba, Sr, Al, and As, are determined in condensates at low but measurable concentrations. This means that chemical elements, both main mineral-forming and trace elements, are capable of being captured by water and migrating with the vapor phase.

### Sample mineralogy and its transformation under heating

To detail the separation of the vapor-gas mixture from the solid, individual mineral phases were studied. Experiments to determine changes in minerals when heated were performed with reference to various sulfates that make up the lens. Experimental mineral samples consist of secondary hydrous sulfates of Cu, Zn, Fe, and Mg (Table 5).

In addition to the main mineral-forming elements, sulfates contain admixtures of many metals and metalloids and thin mutual intergrowths due to the complex composition of pore solutions from which they were crystallized. The typical admixtures in goslarite are Cu, Ni, Fe, Al, K, and Ca, and the elements As, Ba, and Co are less common. Siderotil contains Cu, Zn, Ni, Co, Mn, Mg, and Ag. Starkeyite is characterized by elevated concentrations of Cu, Zn, Ni, Fe, and Mn.

The first step of heating (at 40 °C) led to a reduction in weight in all of the studied samples. The greatest weight loss (23 %) was recorded in sample BS-2, consist-

ing mainly of goslarite with impurities of sideronatrite and cyanochroite. Samples BS-5 and BS-6 became 13 % lighter. In addition, antlerite (sample BS-1) lost only 0,18 % of its weight (Table 5).

As follows from the results of XRD analyses, the diffraction pattern of antlerite after heating at 40 and 50 °C remained without alteration based on comparison with the initial pattern (Fig. 6). A slight weight reduction occurred due to the separation of sorbed water.

***Table 5.*** *Transformation of minerals of the studied samples during heating*
***Таблица 5.*** *Изменение минералов изучаемых образцов при нагревании*

| No | Mineral<br>Минерал | Formula<br>Формула | transformation during heating<br>преобразование во время нагрева | | | |
|---|---|---|---|---|---|---|
| | | | 40 °C | | 50 °C | |
| | | | w.l., %<br>ппн, % | new-formed minerals<br>новообразованные минералы | w.l., %<br>ппп, % | new-formed minerals<br>новообразованные минералы |
| BS-1 | antlerite<br>антлерит | $Cu_3(SO_4)(OH)_4$ | 0,18 | n.a.<br>б.изм. | 1,4 | n.a.<br>б.изм. |
| BS-2 | goslarite<br>госларит | $Zn(SO_4)\times7H_2O$ | 23 | gunningite<br>$ZnSO_4\times H_2O$<br>ганнингит | 7,8 | n.a.<br>б.изм. |
| | sideronatrite<br>сидеронатрит | $Na_2Fe(SO_4)_2(OH)\times3H_2O$ | | Na-jarosite<br>$NaFe_3(SO_4)_2(OH)_6$<br>Na-ярозит | | n.a.<br>б.изм. |
| | cyanochrocite<br>цианохрокит | $K_2Cu(SO_4)_2\times6H_2O$ | | poitevinite<br>$(Cu,Fe)SO_4\times H_2O$<br>поитевинит | | brochantite<br>$Cu_4(SO_4)(OH)_6$<br>брошантит |
| BS-5 | siderotil<br>сидеротил | $Fe(SO_4)\times5H_2O$ | 13 | became less<br>стало меньше | 8,9 | parabutlerite $Fe(SO_4)\times2H_2O$<br>парабутлерит |
| | starkeyite<br>старкеит | $MgSO_4\times H_2O$ | | structure was loosened<br>структура разрыхлилась | | structure was even more loosened<br>структура еще более разрыхлилась |
| BS-6 | gunningite<br>ганнингит | $ZnSO_4\times H_2O$ | 13 | n.a.<br>б.изм. | 19 | n.a.<br>б.изм. |

*Note: w.l. – weight losses; n.a. – no alteration.*
*Примечание: ппн – потеря веса при нагревании; б.изм. – без изменений.*

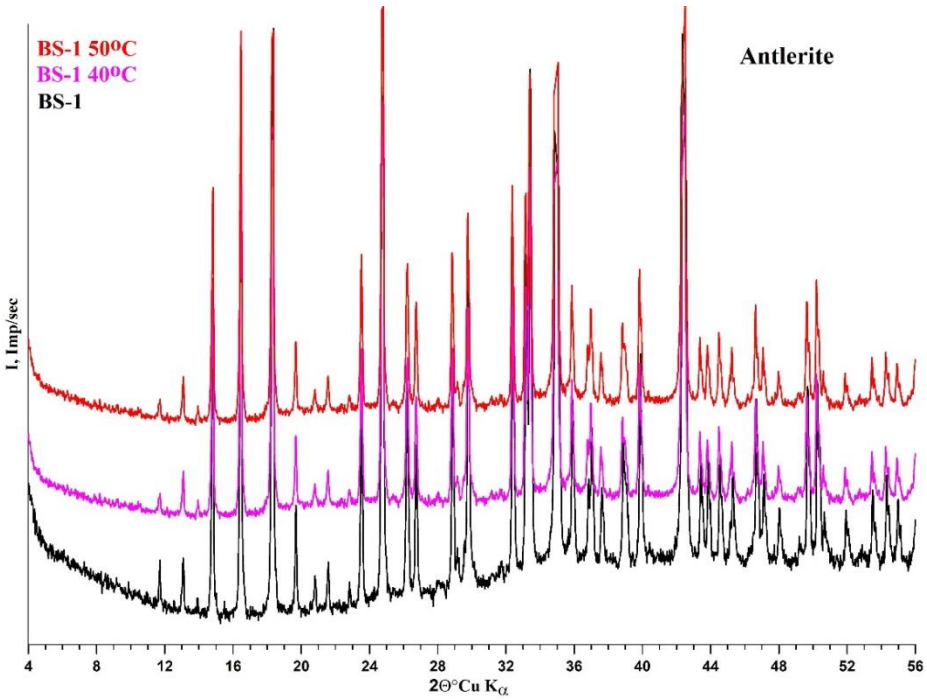



***Fig. 6.*** *Diffraction patterns of sample BS-1*
***Рис. 6.*** *Дифрактограмма образца BS-1*

However, the diffraction pattern of sample BS-2 changed significantly (Fig. 7, *a*). At the first step of heating (40 °C), peaks of some minerals disappeared (goslarite, sideronatrite, and cyanochroite), and peaks of other minerals appeared (Na-jarosite, gunningite, and poitevinite+brochantite). Obviously, this process occurred

due to the separation of molecules of structural $H_2O$ and the transformation of the minerals to another phase. At the second heating step (50 °C), the diffraction pattern was insignificantly altered, and changes were related to reciprocal substitutions of poitevinite-brochantite.

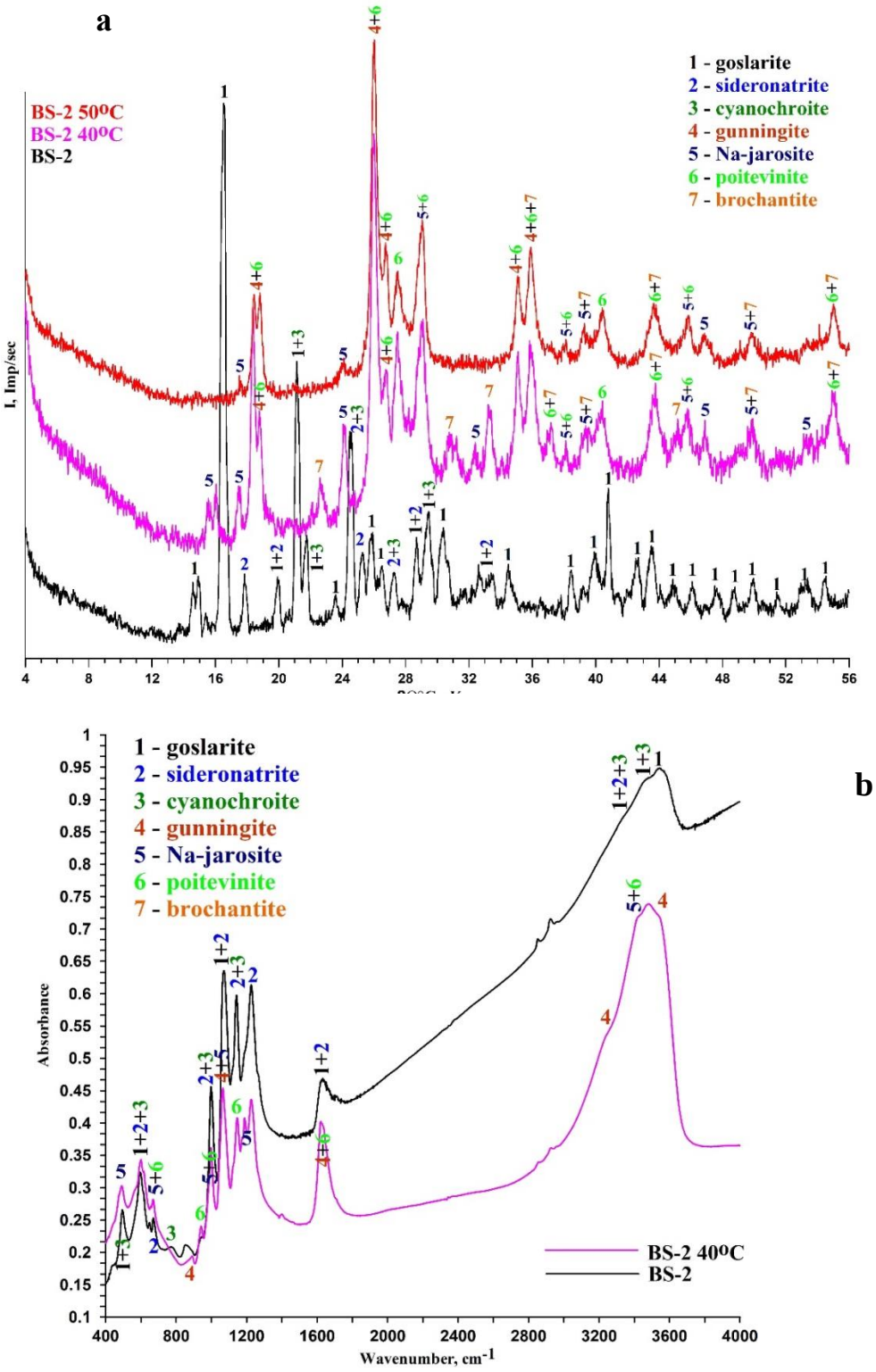



***Fig. 7.*** *a) diffraction patterns of sample BS-2; b) comparative IR spectrum of the initial sample BS-2 and heated to 40 °C*
***Рис. 7.*** *a) дифрактограмма образца BS-2; b) сравнение ИК-спектров исходного образца и после нагрева до 40 °C*

To confirm the mineral transformations for this sample, we compared the IR data of the initial sample and the sample heated to 40 °C (Fig. 7, *b*). The characteristic absorption bands of goslarite, sideronatrite and cyanochroite are clearly visible in the initial spectrum. In the sample heated to 40 °C, the transitions of goslarite to gunningite,

sideronatrite to Na-jarosite, and cyanochroite to poitevinite are noticeable.

Sample BS-5 was mainly siderotil, and starkeyite was a minor phase. After heating at 40 °C, the amount of siderotil decreased, and only traces remained (Fig. 8). The first peaks of parabutlerite appeared, indicating the separation of 3 $H_2O$ molecules from siderotil and its transformation to a new phase. Starkeyite began to prevail in the sample, but its structure became less clear. Then, at 50 °C, the siderotil disappeared completely and was replaced by parabutlerite, and the structure of starkeyite became even looser.

Sample BS-6, consisting of mainly gunningite and siderotil as a minor phase, was partly altered (Fig. 9). Gunningite remained without alteration at 40 and 50 °C, but peaks of siderotil disappeared. As in sample BS-2, weight loss was caused by the release of sorbed and structural water.

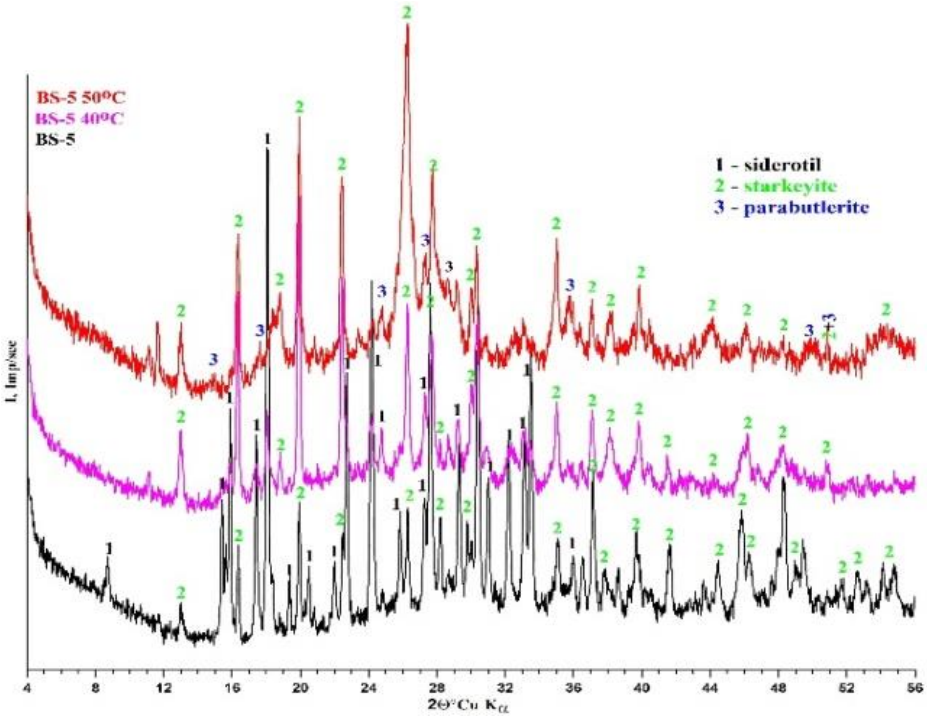



***Fig. 8.*** *Diffraction patterns of sample BS-5*
***Рис. 8.*** *Дифрактограмма образца BS-5*

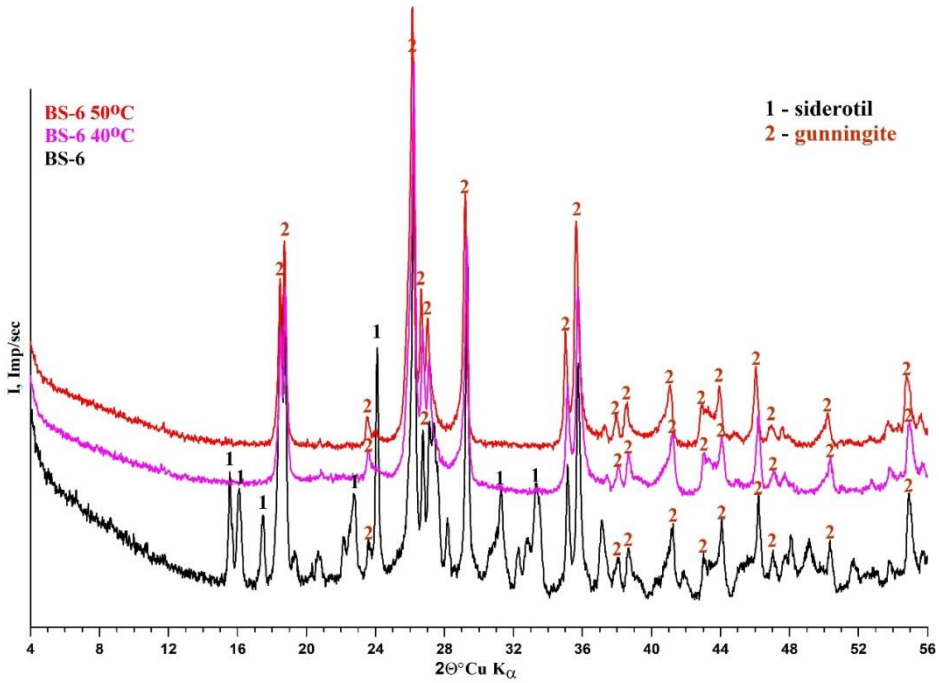



***Fig. 9.*** *Diffraction patterns of sample BS-6*
***Рис. 9.*** *Дифрактограмма образца BS-6*

### Discussion

From the resulting X-ray diffractograms, the scheme of mineral transformation can be presented as follows (Fig. 10). In sample BS-2, goslarite lost 6 molecules of water and transformed to gunningite. It is known that during dehydration, goslarite first transitions into bianchite – 6 aqueous sulfate, then into boleyte, and only then into guanningite [48, 49]. In our experiment, goslarite transformed into gunningite instantaneously. Sideronatrite lost 3 water molecules and was replaced by Na-jarosite. In addition, cyanochroite transformed to poitevinite after the loss of 5 water molecules. In total, the sample lost 23 % of its weight due to separation of sorbed and structural water. At the next temperature step, weight loss was due to separation of sorbed water only and therefore was much less. In sample BS-5, siderotil began to decompose at 40 °C (Fig. 11). Its amount became less due to the separation of 3 water molecules, and the first grains of parabutlerite appeared; then, at 50 °C, it replaced siderotil completely. The structure of starkeyite was loosened. Thus, the weight losses of this sample were mainly due to the separation of sorbed water, with a small contribution of the loss of structural water.

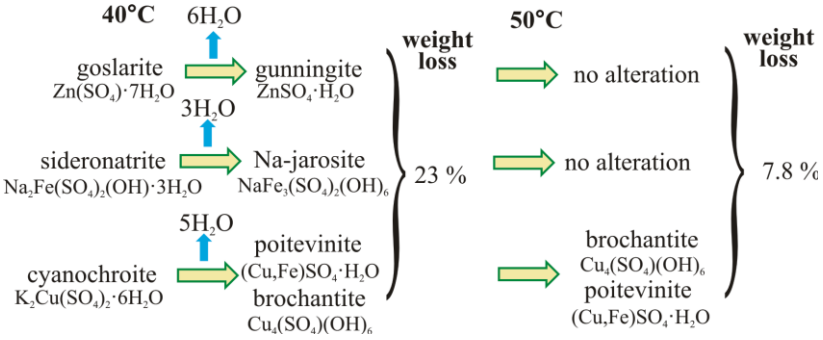



***Fig. 10.*** *Scheme of mineral transformation upon heating sample BS-2*
***Рис. 10.*** *Схема изменений минералов при нагревании образца BS-2*

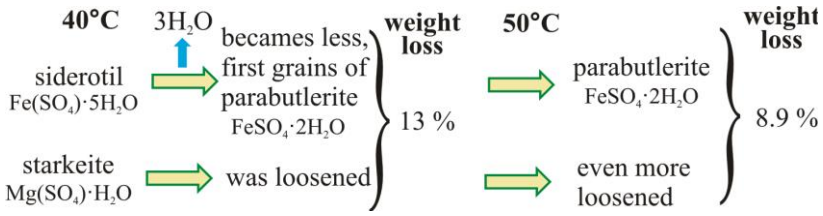



***Fig. 11.*** *Scheme of mineral transformation upon heating sample BS-5*
***Рис. 11.*** *Схема изменений минералов при нагревании образца BS-5*

Thus, collected condensate from the dry sample is both sorbed and structural water is released during sample heating. Condensate from the wet sample also contains some part of water from the pore solution and is characterized by higher concentrations of almost all elements, obviously due to the input of elements from two sources: the solid matter (sulfate minerals) and the pore solution. However, the excess concentrations of elements in condensates from the wet sample are not as large as one would expect, based on the high salinity of the pore solution. The concentrations of Cd, Cr, Rb, and V are higher in the condensate obtained from the dry samples. The concentrations of Mn, Li, K, Ti, and Co are almost the same in both types of condensates.

A wide variety of element species in the pore solution and the highly active interactions determine the complexity of their behavior during the separation of the vapor phase and the absence of correlation between the total element concentrations in the solution and in the resulting condensate. Some features of the condensate composition, and therefore, the behavior of the elements during the separation of the vapor phase from the solution, were explained by the analysis of the results of physicochemical modeling. In general, rather similar concentrations of elements in condensates from the wet and dry samples are apparently determined by the element speciation in the pore solution, namely, the high percentage of sulfate complexes of most elements. As our previous research has shown, water vapor transports elements in the form of aqueous ions, whereas complexed species (such as Me-$SO_4$(aq), Me(OH), etc.) are characterized by inert behavior during separation of the vapor phase and remain in the salt residue [34]. In particular, the low V concentrations in condensates from the wet sample were caused by the formation of vanadyl ions in a solution, which are less mobile than the aqua ions. The phase composition is of great importance and determines whether an element is found in true solution or in the form of a suspension. As numerical modeling showed, many of the elements under discussion are able to form solid phases in the pore solution and can then be dissolved or precipitated. The inert behavior of iron, as mentioned before, is a mystery because at the temperature of the experiment (60 °C), 99 % of the iron is in the dissolved form, and the aqua ion $Fe^{2+}$, by analogy with other metals, should be rather mobile.

The observed features of the vapor phase composition from the dry sample were apparently determined by the crystalline structure of the minerals. The effect of leaching cations and admixtures from minerals is known to occur when minerals interact with water. The cations then go into solution and are replaced by $H^+$ ions. Such a reaction can occur in the near-surface layer of a mineral when it comes into contact with water sorbed on the surface of the grain. The increase in temperature accelerates the dissolution of the surface of grains by sorbed water and the transfer of elements into the solution, which then evaporates in the form of a vapor-gas phase. In this case, condensation of the formed vapors on less heated areas of the surface and structural defects are possible because the sample is heated unevenly. The condensed vapors also interact with the grains, and further dissolution occurs.

Using physicochemical calculation of equilibrium during the heating of goslarite, the phase transition observed in the experiment was itemized and quantitatively described. The temperature of transition of goslarite to gunningite in the calculations was 45 °C, while approximately 1 % of zinc contained in the mineral passed into the separated structural water in aqua ion form. Further transport of zinc into the vapor phase can possibly occur by a mechanism comparable to the flotation. Water molecules can act as flotation reagents, capturing zinc ions and lifting them into the vapor phase.

When hydrous sulfates are heated, dehydration occurs, and water, which is part of the mineral structure, is added to the sorbed water. The resulting water reacts with the surface of the solid phase, and the surface of the grain is dissolved. However, it is possible that with dehydration, cations can be extracted from the crystal lattice and replaced by protons. This is evidenced by a high concentration of elements in condensates from Cu- and Zn-sulfates.

## Conclusion

By analyzing the condensates, it was determined that a wide range of chemical elements can migrate with vapor-gas streams from secondary hydrous sulfates under relatively low-temperature conditions (60 °C). Condensate from the wet sample contains high element concentrations due to the input of elements from the pore solution and hydrous sulfates.

Vapor from the dry sample consists of sorbed and structural water. The destruction of goslarite, sideronatrite, cyanochroite, and siderotil with the separation of water occurs at 40 °C. Structural water separates from these minerals, after which new minerals are formed (gunningite $ZnSO_4{\times}H_2O$ from goslarite $Zn(SO_4){\times}7H_2O$, Na-jarosite $NaFe_3(SO_4)_2(OH)_6$ from sideronatrite $Na_2Fe(SO_4)_2(OH){\times}3H_2O$, and poitevinite $(Cu,Fe)SO_4{\times}H_2O$ and brochantite $Cu_4(SO_4)(OH)_6$ from cyanochroite). Antlerite, gunningite and starkeyite remain stable over the studied temperature range (up to 50 °C).

Alterations in mineral structure and water release are indicated by losses of sample weight. With dehydration, cations and trace elements can be extracted from the crystal lattice, replaced by protons, and can then enter the vapor-gas phase when the solution evaporates.

*This research was financially supported by RFBR (grant no. 20-05-00126) and State assignment of IPGG SB RAS (project no. 0331-2019-0031). The authors gratefully thank anonymous reviewer for helpful comments and recommendations on this manuscript.*

## REFERENCES

1. Boyd R., Barnes S.J., De Caritat P., Chekushin V.A., Melezhik V.A., Reimann, C., Zientek, M.L. Emissions from the copper-nickel industry on the Kola Peninsula and at Noril'sk, Russia. *Atmospheric Environment*, 2009, vol. 43, pp. 1474–1480.
2. Šerbula S.M., Živković D.T., Radojević A.A., Kalinović T.S., Kalinović J.V. Emission of $SO_2$ and $SO_4$ from copper smelter and its influence on the level of total S in soil and moss in Bor, Serbia, and the surroundings. *Chemical industry*, 2015, vol. 69, no. 1, pp. 51–58.
3. Stovern M., Felix O., Csavina J., Rine K.P., MacKenzie R., Russell M.R., Robert M., Jones R.M., King M., Betterton E.A., Saez A.E. Simulation of windblown dust transport from a mine tailings impoundment using a computational fluid dynamics model. *Aeolian Resources*, 2014, vol. 14, pp. 75–83.
4. Stovern M., Guzman H., Rine K.P., Felix O., King M., Ela W.P., Betterton E.A., Saez A.E. Windblown dust deposition forecasting and spread of contamination around mine tailings. *Atmosfera*, 2016, vol. 7, Iss. 2, no. 16. Available at: https://doi.org/10.3390/atmos7020016 (accessed 15 November 2021).
5. Maseki J., Annegarn H.J., Spiers G. Health risk posed by enriched heavy metals (as, Cd, and Cr) in airborne particles from Witwatersrand gold tailings. *Journal of the Southern African Institute of Mining and Metallurgy*, 2017, vol. 117, no. 7, pp. 663–669.
6. Bisquert D.S., Castejon J.M.P., Fernandez G.G. The impact of atmospheric dust de- position and trace elements levels on the villages surrounding the former mining areas in a semi-arid environment (SE Spain). *Atmospheric Environment*, 2017, vol. 152, pp. 256–269.
7. Djebbi C., Chaabani F., Font O., Queralt I., Querol X. Atmospheric dust deposition on soils around an abandoned fluorite mine (Hammam Zriba, NE Tunisia). *Environmental Resourses*, 2017, vol. 158, pp. 153–166.
8. Gerding J., Novoselov A.A., Morales J. Climate and pyrite: two factors to control the evolution of abandoned tailings in Northern Chile. *Journal of Geochemical Exploration*, 2021, vol. 221, p. 106686.
9. Fattahi S.M., Soroush A., Huang N., Zhang J., Yu Y., Jodari Abbasi S. Durability of biotechnologically induced crusts on sand against wind erosion. *Journal of Arid Environments*, 2021, vol. 189, p. 104508.
10. Csavina J., Taylor M.P., Félix O., Rine K.P., Sáez A.E., Betterton E.A. Size-resolved dust and aerosol contaminants associated with copper and lead smelting emissions: implications for emission management and human health. *Science of Total Environment*, 2014, vol. 493, pp. 750–756.
11. Sanchez de la Campa A.M., Sanchez-Rodas D., Gonzalez Castanedo Y., de la Rosa J.D., Geochemical anomalies of toxic elements and arsenic speciation in airborne particles from Cu mining and smelting activities: Influence on air quality. *Journal of Hazards Material*, 2015, vol. 291, pp. 18–27.
12. González-Castanedo Y., Moreno T., Rocío Fernández-Camacho R., Sanchez de la Campa AnaMaría, Alastuey A., Querol X., Rosa J. Size distribution and chemical com- position of particulatematter stackemissions in and around a copper smelter. *Atmospheric Environment*, 2014, vol. 98, pp. 271–282.
13. Gopalapillai Y., Kirk J.L., Landis M. S., Muir D.C., Cooke C.A., Gleason A., Allie Ho Kelly E., Schindler D., Wang X., Lawson G. Source analysis of pollutant elements in winter air deposition in the Athabasca oil sands region: A temporal and spatial study. ACS *Earth Space Chemistry*, 2019, vol. 3, no. 8, pp. 1656–1668.
14. Dall'Osto M., Beddows D.C.S., Asmi A., Poulain L., Hao L., Freney E., Allan J.D., Canagaratna M., Crippa M., Bianchi F., de Leeuw G., Eriksson A., Swietlicki E., Hansson H.C., Henzing J.S., Granier C., Zemankova K., Laj P., Onasch T., Prevot A., Putaud J.P., Sellegri K., Vidal M., Virtanen A., Simo R., Worsnop D., O'Dowd C., Kulmala M., Harrison R.M. Novel insights on new particle formation derived from a pan-european observing system. *Science Report*, 2018, vol. 8, no. 1482. DOI: 10.1038/s41598-017-17343-9

15. Csavina J., Field J., Taylor M.P., Gao S., Landázuri A., Betterton E.A., Sáez A.E. A review on the importance of metals and metalloids in atmospheric dust and aerosol from mining operations. *Science of Total Environment*, 2012, vol. 433, pp. 58–73.
16. Ritchie A.I.M. Oxidation and gas transport in piles of sulfidic material. *Environmental aspects of mine wastes*. Eds. J.L. Jambor, D.W. Blowes, A.I.M. Ritchie. Vancouver, BC, 2003. Vol. 31, pp. 73–94.
17. Martin V., Aubertin M., Bussière B., Mbonimpa M., Dagenais A.M., Gosselin M. Measurement of oxygen consumption and diffusion in exposed and covered reactive mine tailings. *Proceedings of 7th ICARD*. St. Louis MO, USA, 2006. pp. 1156–1169.
18. Binning P.J., Postma D., Russell T.F., Wesselingh J.A., Boulin P.F. Advective and diffusive contributions to reactive gas transport during pyrite oxidation in the unsaturated zone. *Water Resources Research*, 2007, vol. 43, Iss. 2, no. W02414. DOI: 10.1029/2005WR004474
19. Vriens B., Arnault M.S., Laurenzi L., Smith L., Mayer K.U., Beckie R.D. Localized sulfide oxidation limited by oxygen supply in a full-scale waste-rock pile. *Vadose Zone Journal*, 2018, vol. 17, Iss. 1, no. 180119. DOI: 10.2136/vzj2018.06.0119
20. Cabassi J., Tassi F., Venturi S., Calabrese S., Capecchiacci F., D'Alessandro W., Vaselli O. A new approach for the measurement of gaseous elemental mercury (GEM) and $H_2S$ in air from anthropogenic and natural sources: Examples from Mt. Amiata (Siena, Central Italy) and Solfatara Crater (Campi Flegrei, Southern Italy). *Journal of Geochemical Exploration*, 2017, vol. 175, pp. 48–58.
21. Nacht D.M., Gustin M.S., Engle M.A., Zehner R.E., Giglini A.D. Atmospheric mercury emissions and speciation at the Sulphur Bank Mercury Mine Superfund Site, Northern California. *Environmental Science Technology*, 2004, vol. 38, pp. 1977–1983.
22. Eckley C.S., Gustin M., Marsik F., Miller M.B. Measurement of surface mercury fluxes at active industrial gold mines in Nevada (USA). *Science of Total Environment*, 2011, vol. 409, pp. 514–522.
23. Miller M.B., Gustin M.S. Gas-exchange chamber analysis of elemental mercury deposition/emission to alluvium, ore, and mine tailings. *Chemosphere*, 2015, vol. 131, pp. 209–216.
24. Porstendörfer J. Properties and behaviour of radon and thoron and their decay products in the air. *Journal Aerosol Science*, 1994, vol. 25, pp. 219–263.
25. Gee K.F., Poon H.Y., Hashisho Z., Ulrich A.C. Effect of naphtha diluent on greenhouse gases and reduced sulfur compounds emissions from oil sands tailings. *Science of Total Environment*, 2017, vol. 598, pp. 916–924.
26. Hale M. Mineral deposits and chalcogen gases. *Mineral Mag.*, 1993, vol. 57, pp. 599–606.
27. Hale M. Gas geochemistry and deeply buried mineral deposits: the contribution of the applied geochemistry research group, Imperial College of Science and Technology, London. *Geochemistry: exploration, environment, analysis*, 2010, vol. 10, pp. 261–267.
28. Zhou C., Liu G., Wu S., Lam P.K.S. The environmental characteristics of usage of coal gangue in bricking-making: a case study at Huainan, China. *Chemosphere*, 2014, vol. 95, pp. 274–280.
29. Sánchez-Rodas D., Alsioufi L., Sánchez de la Campa A.M., González-Castanedo Y. Antimony speciation as geochemical tracer for anthropogenic emissions of atmospheric particulate matter. *J. Hazard. Mater.*, 2017, vol. 324, pp. 213–220.
30. Vinogradova, I.V. *Paroobraznye ionnye formy elementov v pochvennom vozdukhe i prizemnoy atmosfere kak indikatory rudnykh mestorozdeniy i ecologicheskoy situatsii.* Avtoreferat Dis. Kand. nauk [Vapor ionic forms of elements in soils air and in ground layer of atmosphere as a indicators of ore deposit and ecological situation. Cand. Diss. Abstract]. St. Peterburg, 1995. 22 p
31. Larocque A.C.L., Rasmussen P.E. An overview of trace metals in the environment, from mobilization to remediation. *Environmental Geology*, 1998, vol. 33, no. 2, pp. 85–91.
32. Bortnikova S.B., Olenchenko V.V., Gaskova O.L., Chernii K.I., Devyatova A.Yu., Kucher D.P. Evidence of trace element emission during the combustion of sulfidebearing metallurgical slags. *Applied Geochemistry*, 2017, vol. 78, pp. 105–115.
33. Bortnikova S.B., Yurkevich N.V., Abrosimova N.A., Devyatova A.Y., Edelev A.V., Makas A.L., Troshkov M.L. Assessment of emissions of trace elements and sulfur gases from sulfide tailings. *Journal Geochemical Exploration*, 2018, vol. 186, pp. 256–269.
34. Bortnikova S., Yurkevich N., Devyatova A., Saeva O., Shuvaeva O., Makas A., Troshkov M., Abrosimova N., Kirillov M., Korneeva T., Kremleva T. Mechanisms of low-temperature vapor-gas streams formation from sulfide mine waste. *Science of Total Environment*, 2019, vol. 647, pp. 411–419.
35. Bortnikova S., Yurkevich N., Devyatova A., Abrosimova N., Saeva O., Cherny N., Troitskii D. Transfer of chemical elements in vapor-gas streams at the dehydration of secondary sulfates. *E3S Web of Conferences*, 2019, vol. 98, p. 05004.
36. Bortnikova S., Abrosimova N., Yurkevich N., Zvereva V., Devyatova A., Gaskova O., Saeva O., Korneeva T., Shuvaeva O., Pal'chik N., Chernukhin V., Reutsky A. Gas transfer of metals during the destruction of efflorescent sulfates from the Belovo Plant Sulfide Slag, Russia. *Minerals*, 2019, vol. 9, Iss. 6, no. 344.
37. Jambor J.L., Nordstrom D.K., Alpers C.N. Metalsulphate salts from sulphide mineral oxidation. *Reviews in Mineralogy & Geochemistry*, 2000, vol. 40, pp. 303–350.
38. Gas'kova O.L., Shironosova G.P., Bortnikova S.B. Thermodynamic estimation of the stability field of bukovskyite, an iron sulfoarsenate. *Geochemistry International*, 2008, vol. 46, pp. 85–91.
39. Bortnikova S.B., Yurkevich N.V., Gaskova O.L., Devyatova A.Y., Novikova I.I., Volynkin S.S., Mytsik A.V., Podolinnaya V.A. Element transfer by a vapor-gas stream from sulfide mine tailings: from field and laboratory evidence to thermodynamic modeling. *Environmental Science and Pollution Research*, 2021. vol. 28. pp. 14927–14942.
40. Bortnikova S., Gaskova O., Yurkevich N., Saeva O., Abrosimova N. Chemical treatment of highly toxic acid mine drainage at a gold mining site in Southwestern Siberia, Russia. *Minerals*, 2020, vol. 10, pp. 1–23.
41. Olenchenko V.V., Osipova P.S., Yurkevich N.V., Bortnikova S.B. Electrical resistivity dynamics beneath the weathered mine tailings in response to ambient temperature. *Journal of Environmental and Engineering Geophysics*, 2020, vol. 25. pp. 55–63.
42. Sidenko N.V., Giere R., Bortnikova S.B., Cottard F., Palchik N.A. Mobility of heavy metals in self-burning waste heaps of the zinc smelting plant in Belovo (Kemerovo Region, Russia). *Journal of Geochemical Exploration*, 2001, vol. 74, no. 1–3, pp. 109–125.
43. Bortnikova S., Manstein Yu., Saeva O., Yurkevich N., Gaskova O., Bessonova E., Romanov R., Ermolaeva N., Chernuhin V., Reutsky A. Acid mine drainage migration of Belovo Zinc Plant (South Siberia, Russia): multidisciplinary study. *Water security in the Mediterranean Region. An International Evaluation of Management, Control, and Governance Approaches*. Eds. A. Scozzari, B. Mansouri. Netherlands, Springer, 2011. pp. 191–208.
44. Piminov P.A., Baranov G.N., Bogomyagkov A.V. Synchrotron radiation research and application at VEPP-4. *Physics Procedia*, 2016, vol. 84, pp. 19–26.
45. Woods T.L., Garrels R.M. *Thermodynamic values at low temperature for natural inorganic materials: an uncritical summary*. New York, Oxford University Press, 1987, 284 p.
46. Yokokawa H. Tables of thermodynamic properties of inorganic compounds. *Journal of the National Chemical Laboratory for Industry*, 1988, vol. 83, pp. 27–121.
47. Chudnenko K.V. *Termodinamicheskoe modelirovanie v geokhimii; teoriya, algoritmy, programnoe obespechenie, prilozheniya* [Thermodynamic modeling in geochemistry: theory, algorithms, software, applications.] Novosibirsk, PH Geo Publ., 2010. 283 p.
48. Anderson J.L., Peterson R.C., Swainson I.P. Combined neutron powder and X-ray single-crystal diffraction refinement of the atomic structure and hydrogen bonding of goslarite ($ZnSO_4{\times}7H_2O$). *Mineralogy Magazine*, 2005, vol. 69, no. 3, pp. 259–271.
49. Chou M., Seal R.R. Determination of goslarite-bianchite equilibria by the humidity-buffer technique at 0.1 MPa. *Chemical Geology*, 2005, vol. 215, no. 1–4, pp. 517–523.

*Received: 23 December 2021.*

**Information about the authors**

***Svetlana B. Bortnikova***, Dr. Sc., professor, Trofimuk Institute of Petroleum Geology and Geophysics of the Siberian Branch of the RAS.

***Natalya A. Abrosimova***, Cand. Sc., researcher, Trofimuk Institute of Petroleum Geology and Geophysics of the Siberian Branch of the RAS .

***Anna Yu. Devyatova,*** Cand. Sc., senior researcher, Trofimuk Institute of Petroleum Geology and Geophysics of the Siberian Branch of the RAS.

***Elizaveta P. Shevko***, Dr. Sc., senior researcher, Sobolev Institute of Geology and Mineralogy of the Siberian Branch of the RAS.

***Nataliya V. Yurkevich***, Cand. Sc., leading researcher, Trofimuk Institute of Petroleum Geology and Geophysics of the Siberian Branch of the RAS.

***Nikolay K. Cherny***, engineer, Trofimuk Institute of Petroleum Geology and Geophysics of the Siberian Branch of the RAS.

***Irina V. Danilenko***, Cand. Sc., researcher, Sobolev Institute of Geology and Mineralogy of the Siberian Branch of the RAS.

***Nadezhda A. Palchik***, Cand. Sc., senior researcher, Sobolev Institute of Geology and Mineralogy of the Siberian Branch of the RAS.

УДК 550.46

# ЛЕТУЧЕСТЬ ХИМИЧЕСКИХ ЭЛЕМЕНТОВ ПРИ ДЕГИДРАЦИИ ВТОРИЧНЫХ СУЛЬФАТОВ

**Бортникова Светлана Борисовна**[1],
BortnikivaSB@ipgg.sbras.ru

**Абросимова Наталья Александровна**[1],
AbrosimovaNA@ipgg.sbras.ru

**Девятова Анна Юрьевна**[1],
DevyatovaAY@ipgg.sbras.ru

**Шевко Елизавета Павловна**[2],
Liza@igm.nsc.ru

**Юркевич Наталия Викторовна**[1],
YurkevichNV@ipgg.sbras.ru

**Черный Николай Константинович**[1],
wulfgar.nk@gmail.com

**Даниленко Ирина Владимировна**[2],
iv_danilenko@igm.nsc.ru

**Пальчик Надежда Арсентьевна**[2],
nadezhda@igm.nsc.ru

[1] Институт нефтегазовой геологии и геофизики им. А.А. Трофимука СО РАН,
Россия, 630090, г. Новосибирск, пр. Ак. Коптюга, 3.

[2] Институт геологии и минералогии им. С.Л. Соболева Сибирского отделения РАН,
Россия, 630090, г. Новосибирск, пр. Ак. Коптюга, 3.

***Актуальность.*** *Загрязнение воздуха в результате деятельности горнодобывающей и металлургической промышленности является серьезной проблемой для окружающей среды. Это исследование проводилось с целью определения возможных механизмов миграции и источников элементов в атмосфере над поверхностью хвостохранилищ.*
***Основная цель исследования*** *– показать, что химические элементы могут захватываться водяным паром и могут мигрировать с паровой фазой во время десорбции и дегидратации водных сульфатов.*
***Объект:*** *образцы с поверхности отвалов, Белово (Беловский цинкозавод, Белово, Россия).*
***Методы.*** *Порошковая рентгеновская дифрактометрия (XRD) использовалась для определения фазового состава кристаллических веществ, их количественных фазовых соотношений и превращений. Для определения элементов в пробах воды (поровый раствор и конденсаты) использовали прибор Agilent 8800 ICP-MS (Токио, Япония), оборудованный распылителем MicroMist. Также использовались бинокулярный микроскоп и методы физико-химического моделирования.*
***Результаты.*** *Путем анализа конденсатов было определено, что широкий спектр химических элементов может мигрировать с парогазовыми потоками из вторичных гидросульфатов в относительно низкотемпературных условиях (60 °C). Конденсат влажного образца содержит высокие концентрации элементов из-за поступления элементов из порового раствора и водных сульфатов. На изменение минеральной структуры и выделение воды указывает потеря веса пробы. При дегидратации катионы и микроэлементы могут быть извлечены из кристаллической решетки, заменены протонами и затем могут перейти в парогазовую фазу при испарении раствора.*

***Ключевые слова:***
*Вторичные сульфаты, поровый раствор, конденсаты, хвостохранилища, летучесть химических элементов.*

*Работа выполнена при финансовой поддержке РФФИ (грант № 20-05-00126) и в рамках Гос. задания ИНГГ СО РАН, проект № 0331-2019-0031.*

**Информация об авторах**

***Бортникова Светлана Борисовна***, доктор геолого-минералогических наук, профессор, Институт нефтегазовой геологии и геофизики им. А.А. Трофимука СО РАН

***Абросимова Наталья Александровна***, кандидат геолого-минералогических наук, научный сотрудник Института нефтегазовой геологии и геофизики им. А.А. Трофимука СО РАН.

***Девятова Анна Юрьевна***, кандидат геолого-минералогических наук, старший научный сотрудник, Институт нефтегазовой геологии и геофизики им. А.А. Трофимука СО РАН.

***Шевко Елизавета Павловна***, доктор геолого-минералогических наук, старший научный сотрудник Института геологии и минералогии им. С.Л. Соболева Сибирского отделения РАН.

***Юркевич Наталия Викторовна***, кандидат геолого-минералогических наук, ведущий научный сотрудник, Институт нефтегазовой геологии и геофизики им. А.А. Трофимука СО РАН.

***Черный Николай Константинович***, инженер, аспирант, Институт нефтегазовой геологии и геофизики им. Трофимука СО РАН

***Даниленко Ирина Владимировна***, кандидат геолого-минералогических наук, научный сотрудник Института геологии и минералогии им. С.Л. Соболева Сибирского отделения РАН.

***Пальчик Надежда Арсентьевна***, кандидат геолого-минералогических наук, старший научный сотрудник Института геологии и минералогии им. С.Л. Соболева Сибирского отделения РАН.

*Поступила 23.12.2021 г.*

УДК 621.313.323

# ПРИМЕНЕНИЕ МЕТОДА НЕЛДЕРА–МИДА ДЛЯ ОПТИМИЗАЦИИ ОДНОИМЕННОПОЛЮСНОГО СИНХРОННОГО ДВИГАТЕЛЯ ДЛЯ КАРЬЕРНОГО САМОСВАЛА

**Прахт Владимир Алексеевич**[1],
va.prakht@urfu.ru

**Дмитриевский Владимир Александрович**[1],
vladimir.dmitrievsky@urfu.ru

**Анучин Алексей Сергеевич**[2],
anuchinas@mpei.ru

**Казакбаев Вадим Маратович**[1],
vadim.kazakbaev@urfu.ru

[1] Уральский Федеральный Университет,
Россия, 620002, г. Екатеринбург, ул. Мира, 19.

[2] Национальный исследовательский университет «МЭИ»,
Россия, 111250, г. Москва, ул. Красноказарменная, 14.

***Актуальность*** *исследования обусловлена возрастающей потребностью применения карьерных самосвалов с дизель-электрическим (гибридным) приводом для разработки полезных ископаемых. Улучшение рабочих и стоимостных характеристик электропривода карьерных самосвалов способствует уменьшению затрат при разработке полезных ископаемых.*
***Цель:*** *поиск эффективного подхода для оптимизации одноименнополюсного синхронного двигателя для привода колес карьерного самосвала, позволяющего решить проблему высокой потребности в вычислительных ресурсах при расчете трехмерной модели магнитного поля двигателя; выработка рекомендаций к проектированию одноименнополюсного синхронного двигателя с обмоткой возбуждения на статоре; оптимизация с целью уменьшения потерь мощности и максимального тока двигателя при заданной тяговой характеристике привода для снижения номинального тока и стоимости инверторного полупроводникового модуля электропривода карьерного самосвала с рассматриваемым типом двигателя.*
***Объекты:*** *конструкция шестиполюсного девятифазного одноименнополюсного синхронного двигателя с обмоткой возбуждения на статоре мощностью 370 кВт.*
***Методы:*** *безградиентный метод оптимизации, математическое моделирование, двухмерный метод конечных элементов, метод схем замещения.*
***Результаты.*** *Предложен новый, эффективный с точки зрения точности расчета характеристик и вычислительных затрат, подход к оптимизации одноименнополюсного синхронного двигателя. В результате проведенной оптимизации потери в двигателе и максимальный ток, потребляемый двигателем от инвертора, были значительно снижены. Достигнутое снижение максимального тока позволяет снизить стоимость полупроводниковых модулей инвертора в 1,4 раза, а также позволяет снизить на ту же величину переменную составляющую тока звена постоянного тока инвертора.*

***Ключевые слова:***
*Карьерный самосвал, метод Нелдера–Мида, одноименнополюсный синхронный двигатель, оптимальное проектирование, тяговый двигатель, тяговый привод .*

## Введение

Значительная часть работы по перевозке породы при разработке полезных ископаемых осуществляется с помощью карьерных самосвалов грузоподъемностью 90–450 т. Они имеют преимущества как перед конвейерным транспортом в условиях перемещения горных пород с разными физико-механическими свойствами, так и перед железнодорожным транспортом, позволяя упростить процесс отвалообразования. Одной из особенностей карьерных самосвалов является применение силовых установок больших мощностей, до 4600 л. с. Это влечет за собой неизбежное усложнение трансмиссии. Привод на колеса осуществляется от двигателя внутреннего сгорания через гидромеханическую коробку передач (на самосвалах грузоподъемностью до 100 т) или от системы дизель-электрического привода с мотор-колесами, оснащенными индивидуальной силовой установкой – электродвигателем [1, 2].

Одноименнополюсные синхронные электрические машины (ОСМ, англ. «synchronous homopolar machines») с обмоткой возбуждения на статоре, известные также как индукторные синхронные машины и вентильно-индукторные машины независимого возбуждения, используются в ряде приложений, таких как генераторы летающих и наземных транспортных средств, сварочные генераторы и маховичные накопители энергии [3–6]. Они могут применяться в условиях высоких температур и в опасных средах как приводы [7] и как ветрогенераторы большой мощности [8]. Основными преимуществами ОСМ являются простота конструкции зубчатого ротора и высокая надежность машины в целом за счет отсутствия на роторе обмотки возбуждения или короткозамкнутой литой/сварной обмотки. Из-за недостатков асинхронных двигателей, обычно используемых в тяговых приложениях, таких как низкая надежность сварной

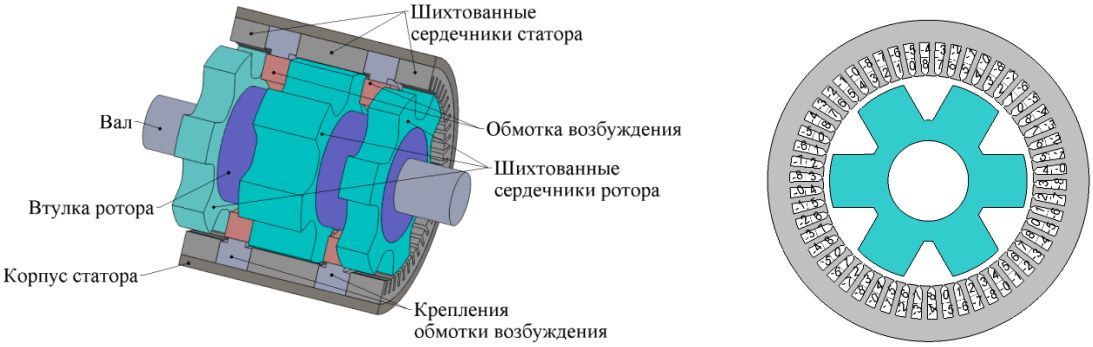

DOI 10.18799/24131830/2022/1/3332

обмотки ротора [9], высокие потери в роторе, трудности управления без датчика положения и сложность использования электрических тормозов при нулевой скорости вращения из-за циклического изменения теплового состояния полупроводниковых устройств инвертора, ряд исследований предлагает использовать ОСМ в качестве тягового двигателя [5, 10]. Однако сложная трехмерная конструкция магнитопровода вызывает трудности при использовании традиционных двухмерных моделей на основе метода конечных элементов (МКЭ) для оценки характеристик ОСМ. По этой причине для ОСМ был предложен ряд оригинальных методов расчета, включая трехмерные МКЭ-модели [11, 12], двухмерные МКЭ-модели [13, 14], одномерные магнитные цепи и их различные комбинации [15, 16]. В [5] предложен метод математической оптимизации тягового одноименнополюсного синхронного двигателя (ОСД). Было показано, что с помощью оптимизации можно значительно снизить потери и пульсации крутящего момента ОСД. Однако в [5] в результате оптимизации ток обмотки якоря не был уменьшен достаточно, чтобы позволить снижение номинальной мощности силовых транзисторных модулей и стоимости тягового инвертора.

В данном исследовании, в отличие от [5], выбрана целевая функция оптимизации, позволяющая значительного уменьшить ток обмотки якоря и, как следствие, использовать более дешевые IGBT-модули (650 А), по сравнению с модулями, используемыми в инверторе неоптимизированного ОСД (1000 А). При оптимизации учитываются ограничения, накладываемые стандартными сечениями прямоугольных обмоточных проводов. Другой целью оптимизации является снижение полных потерь мощности в двигателе.

### Особенности конструкции ОСД и тягового инвертора

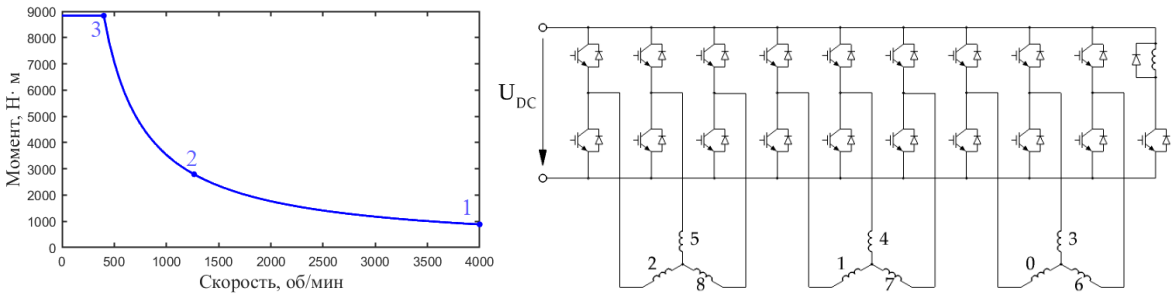
На рис. 1 представлены эскизы девятифазного тягового ОСД. Двигатель имеет три пары пакетов статора и ротора. На статоре размещена девятифазная шестиполюсная обмотка якоря. Обмотка возбуждения состоит из двух катушек, размещенных между пакетами статора. Статор имеет 54 паза. Ротор не имеет обмоток. Каждый пакет ротора имеет 6 зубцов, зубцы соседних пакетов ротора смещены на 30 механических градусов (180 электрических). На рис. 2, *а* показана зависимость максимального крутящего момента от частоты вращения электропривода карьерного самосвала БелАЗ-75570 (90 т). На рис. 2, *б* представлена схема девятифазного тягового инвертора ОСД. Тяговый инвертор ОСД состоит из трех отдельных трехмостовых инверторов и однофазного чоппера для питания обмотки возбуждения [13]. Более подробное описание девятифазного тягового ОСД и инвертора приведено в [5, 13].




*а/a* *б/b*

***Рис. 1.*** *Особенности конструкции одноименнополюсного синхронного двигателя. а) общий вид двигателя. Обмотка на статоре не показана, чтобы не загромождать рисунок; б) поперечное сечение двигателя*

***Fig. 1.*** *Synchronous homopolar motor design features. a) general view. The armature winding on the stator is not depicted so as not to obstruct; b) cross section*




*а/a* *б/b*

***Рис. 2.*** *Диаграммы: а) тяговая характеристика двигателя карьерного самосвала; б) схема инвертора*

***Fig. 2.*** *Drive diagrams: a) traction characteristic of the motor; b) inverter schematic*

### Целевая функция для оптимизации тягового ОСД

Рис. 2, *а* показывает требуемую тяговую характеристику привода заднего колеса рассматриваемого карьерного самосвала [13]. Тяговый привод должен обеспечивать максимальный крутящий момент 8833 Н·м в диапазоне от нулевой до номинальной скорости вращения 400 об/мин. В диапазоне скорости 400 об/мин и выше привод должен обеспечивать мощность не менее 370 кВт. Максимальная скорость вращения, при которой необходимо сохранять механическую мощность 370 кВт, составляет 4000 об/мин.

В табл. 1 показаны рабочие точки двигателя, учитываемые в процедуре оптимизации: максимальный крутящий момент при номинальной скорости; номинальная мощность при максимальной скорости и промежуточная точка со средними геометрическими значениями крутящего момента и скорости. В [5] при оптимизации тягового ОСД удалось значительно снизить потери и пульсации крутящего момента, по сравнению с неоптимизированной конструкцией [13]. Также напряжение питания двигателя уменьшилось с 940 до 772 В. Однако максимальный ток якоря снизился лишь незначительно (с 886 до 816 А). По этой причине как для неоптимизированного ОСД [13], так и для оптимизированного ОСД необходимо использовать инвертор с IGBT модулями FF1000R17IE4 [17] с номинальным током 1000 А. Поскольку при наличии нескольких критериев оптимизации необходимо определить значимость отдельных критериев [18], то для значительного снижения тока якоря необходимо применение оптимизационной функции, при которой снижение тока якоря будет являться наиболее значимой целью оптимизации.

***Таблица 1.*** *Рабочие точки двигателя, учитываемые в процедуре оптимизации*

***Table 1.*** *Operating points of the motor taken into account in optimization*

| Номер рабочей точки Operating point number | Момент, Н·м Torque, N·m | Скорость вращения, об/мин Rotational speed, rpm | Механическая мощность, кВт Mechanical power, kW |
|---|---|---|---|
| 1 | 883 | 4000 | 370 |
| 2 | 2793 | 1265 | 370 |
| 3 | 8833 | 400 | 370 |

При оптимизации тягового ОСД в данном исследовании были поставлены следующие основные цели: 1) существенно снизить ток обмотки якоря; это позволит перейти на более дешевые силовые IGBT модули FF650R17IE4 [19] в инверторе; 2) амплитуда напряжения не должна превышать 1000 В; 3) необходимо снизить общие потери двигателя, по сравнению с неоптимизированной конструкцией ОСД [5].

При оценке потерь двигателя учитываются диапазоны 1–2 и 2–3 на кривой крутящего момента двигателя (рис. 2, *а*). Предполагается, что средние потери в точках, в пределах диапазона, равны среднему арифметическому потерь на его границах (точки 1 и 2; точки 2 и 3, соответственно) и что двигатель с равной вероятностью будет работать в диапазонах между точками 1–2 и между точками 2–3. По этой причине в качестве первой цели оптимизации была выбрана средняя арифметическая величина потерь в диапазонах 1–2 и 2–3, уравнение (1):

$$<P_{losses}>=(P_{losses1}+2\cdot P_{losses2}+P_{losses3})/4. \quad (1)$$

В качестве другой цели оптимизации выбраны пульсации момента двигателя. Рассматриваются как несимметризированные (созданные одной комбинацией пакетов ротора и статора) $TR$, так и симметризированные (созданные целым двигателем, состоящим из трех комбинаций пакетов статора и ротора) $TR_{sym}$ пульсации момента [5]. Последняя цель оптимизации – это максимальный ток обмотки якоря $I_3$, который достигается при максимальном крутящем моменте (рабочая точка 3).

Однокритериальный метод безусловной оптимизации Нелдера–Мида применяется в данной работе для оптимизации конструкции ОСД. Важным преимуществом метода Нелдера–Мида перед другими методами, которые часто используются для оптимизации электрических машин [20, 21], является значительное снижение времени вычислений, что позволяет увеличить количество параметров для оптимизации, а также применить более сложные критерии оптимизации, требующие расчета нескольких нагрузочных точек машины. Это преимущество важно для оптимизации тяговых машин с широким диапазоном регулирования скорости. При использовании метода Нелдера–Мида для многокритериальной оптимизации одним из возможных подходов является применение функции оптимизации в виде суммы отдельных слагаемых, каждое из которых соответствует одному из выбранных критериев оптимизации и имеет определенный весовой коэффициент, отражающий важность данного критерия оптимизации.

С учетом всех поставленных задач функция оптимизации двигателя приобретает форму:

$$F_0=\ln(<P_{losses}>)+0{,}7\cdot\ln(I_3)+0{,}05\cdot\ln[\max(TR_{sym})]+ +0{,}025\cdot\ln[\max(TR)]. \quad (2)$$

Согласно функции оптимизации (2), $<P_{losses}>$ являются наиболее важной целью. Вторая по важности цель – это $I_3$. Снижение $I_3$ на 1 % так же ценно, как уменьшение $<P_{losses}>$ на 0,7 %. Уменьшение $\max(TR_{sym})$ и $\max(TR)$ не так существенно. Уменьшение $\max(TR_{sym})$ и $\max(TR)$ на 1 % так же важно, как и уменьшение $<P_{losses}>$ на 0,05 % и 0,025 % соответственно. Однако включение слагаемых с $\max(TR_{sym})$ и $\max(TR)$ позволяет ограничить увеличение пульсаций крутящего момента двигателя во время оптимизации. Весовые коэффициенты «1», «0,7», «0,05» и «0,025» не рассчитывались каким-либо формальным методом. Эти значения просто указывают приблизительную относительную важность каждой из целей оптимизации, согласно опыту авторов, при проектировании аналогичных машин.

В процедуре оптимизации также учитываются следующие ограничения:

$$U_{DC1}<1000\text{ В};\ B_3<1{,}65\text{ Тл};\ P_{exc}<12000\text{ Вт}, \quad (3)$$

где $U_{DC1}$ – это максимальное линейное амплитудное напряжение, достигаемое на максимально скорости (рабочая точка 1); $P_{exc}$ – это потери мощности в обмотке возбуждения и $B_3$ – это максимальная величина магнитной индукции в нешихтованных участках магнитопровода (втулка ротора и корпус двигателя).

Согласно поставленной задаче, необходимо также ограничить диапазон значений, которые может принимать функция оптимизации. Существуют различные способы реализации ограничений при использовании метода Нелдера–Мида. Например, целевая функция может принимать бесконечное значение, когда ограничения не выполняются. Однако такой подход приводит к быстрому уменьшению объема симплекса. Кроме того, ограничения (3) должны соблюдаться в начальном приближении и во время оптимизации. Чтобы избежать этих трудностей, к целевой функции (2) применяются «мягкие ограничения». Соответствующие слагаемые начинают быстро увеличиваться, если ограничения не выполняются. При применении «мягких ограничений» к целевой функции (2) итоговая функция оптимизации принимает вид:

$$F=F_0+k_1\cdot f\cdot(U_{DC1}/1000[\text{В}]-1)+k_2\cdot f\cdot(B_3/1{,}65[\text{Тл}]-1)+k_3\cdot f\cdot(P_{exc}/12000[\text{Вт}]-1),$$

где $$f(x)=\begin{cases} x, x>0; \\ 0. \end{cases} \quad (4)$$

В (4) первое слагаемое в правой части соответствует выражению (2), второе, третье и четвертое слагаемые реализуют ограничения (3). Отметим, что целевая функция (4) позволяет появление в процессе оптимизации вариантов конструкции, для которых ограничения не выполняются, чтобы предотвратить быстрое уменьшение объема симплекса. Однако, если коэффициенты $k_1$, $k_2$ и $k_3$ достаточно велики, оптимизированная конструкция все же будет удовлетворять ограничениям (3), поскольку при нарушении ограничений добавочные члены дают большой штрафующий вклад в величину $F$. Благодаря использованию целевой функции (4) начальное приближение может не соответствовать ограничениям (3), что и было использовано при выборе начального приближения в рассматриваемом случае. В данном исследовании предполагается, что $k_1=k_2=k_3=1{,}5$, что оказалось достаточным для того, чтобы в результате оптимизации условия (3) были выполнены.

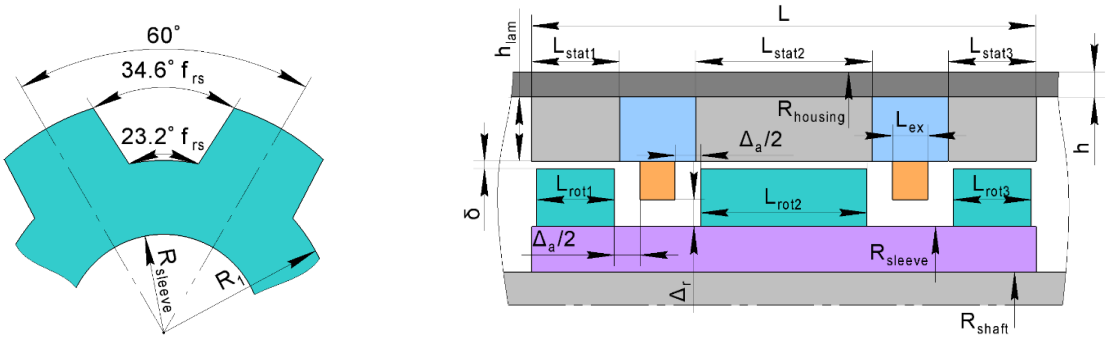
### Исходные параметры конструкции ОСД и параметры, варьируемые в ходе оптимизации

На рис. 3 представлены основные геометрические параметры тягового ОСД [13]. Параметры, которые неизменны и варьируются в ходе оптимизации, показаны в табл. 2, 3, соответственно. Внешние размеры двигателя (длина двигателя без лобовых частей обмотки $L$=545 мм и внешний радиус корпуса статора $R_{housing}$=367 мм) при оптимизации не менялись. Толщина ярма ротора и высота пакета статора также не менялись. Хотя внешний радиус корпуса статора $R_{housing}$ остается постоянным, внутренний радиус пакета статора может варьироваться при изменении толщины корпуса статора $h$. Внешний радиус ротора также зависит от ширины воздушного зазора δ. Для обеспечения равных условий протекания магнитного потока возбуждения в осевом направлении через корпус статора и втулку ротора площади их поперечных сечений задаются равными. В результате внешний радиус втулки ротора определяется по формуле:

$$R_{sleeve}=\sqrt{(R_{shaft}^2+R_{housing}^2-[R_{housing}-h]^2)}. \quad (5)$$

Для неоптимизированной конструкции, описанной в [13], $R_{sleeve}$=161 мм, в то время как расчет по формуле (5) дает $R_{sleeve}$=167 мм. Поскольку толщина ярма ротора, равная $R_1-R_{sleeve}$, не меняется, глубина паза ротора изменяется не только с изменением внешнего диаметра ротора, но и с изменением $R_{sleeve}$.

Изменение угловых размеров между зубцами ротора на внутреннем и внешнем радиусе ротора осуществлялось согласованно путем умножения обоих размеров на коэффициент $f_{rs}$. Продольный и радиальный размеры, занимаемые обмоткой возбуждения между двумя пакетами статора, составляют $L_{ex}$=43 мм и $h_{exc}$=78 мм, соответственно [5]. Во время оптимизации $L_{ex}=(L-L_{stat})/2-\Delta_a$ изменялось совместно с $L_{stat}$. Размер $h_{exc}=R_{housing}-h-h_{lam}-R_{sleeve}-\Delta_r$ изменяется путем изменения $h$, а также с изменением радиуса $R_{sleeve}$, который, согласно (5), также является функцией $h$.




*а/a* *б/b*

***Рис. 3.*** *Геометрические параметры двигателя: а) размеры ротора; б) прочие размеры статора и ротора*

***Fig. 3.*** *Geometric parameters of the motor: a) rotor radial dimensions; b) other stator and rotor dimensions*

***Таблица 2.*** *Некоторые геометрические параметры двигателя, неизменяемые в ходе оптимизации*

***Table 2.*** *Some geometric parameters of the motor invariable during the optimization*

| Параметр/Parameter | Величина [13] Value [13] |
|---|---|
| Длина машины без лобовых частей обмотки $L$, мм<br>Machine length without end winding parts $L$, mm | 545 |
| Длины пакетов статора $L_{stat1}$; $L_{stat2}$; $L_{stat3}$, мм<br>Lengths of the stator stacks $L_{stat1}$; $L_{stat2}$; $L_{stat3}$, mm | 101; 197; 101 |
| Длины пакетов ротора $L_{rot1}$; $L_{rot2}$; $L_{rot3}$, мм<br>Lengths of the rotor stacks $L_{rot1}$; $L_{rot2}$; $L_{rot3}$, mm | 92; 184; 92 |
| Осевой зазор между обмоткой возбуждения и ротором $\Delta_a$, мм<br>Axial clearance between field winding and rotor $\Delta_a$, mm | 30 |
| Радиальный зазор между обмоткой возбуждения и ротором $\Delta_r$, мм<br>Radial clearance between field winding and rotor $\Delta_r$, mm | 27 |
| Толщина ярма ротора $R_1$–$R_{sleeve}$, мм<br>Rotor yoke thickness $R_1$–$R_{sleeve}$, mm | 22,8 |
| Радиус вала $R_{shaft}$, мм<br>Shaft radius $R_{shaft}$, mm | 70 |
| Высота пакета статора $h_{lam}$, мм<br>Stator lamination height $h_{lam}$, mm | 65 |
| Внешний радиус корпуса двигателя $R_{housing}$, мм<br>External radius of the motor housing $R_{housing}$, mm | 367 |

***Таблица 3.*** *Параметры двигателя, варьируемые в ходе оптимизации*

***Table 3.*** *Parameters of the motor varied during the optimization*

| Параметр/Parameter | Исходная величина перед оптимизацией [13] Initial value before the optimization [13] |
|---|---|
| Толщина корпуса $h$, мм<br>Housing thickness $h$, mm | 36 |
| Полная длина пакетов статора $L_{stator}$, мм<br>Total stator stacks length $L_{stator}$, mm | 399 |
| Величина воздушного зазора δ, мм<br>Airgap width $\delta$, mm | 2,3 |
| Коэффициент паза ротора $f_{rs}$<br>Rotor slot factor $f_{rs}$ | 1 |
| Углы ослабления поля в рабочих точках 1, 2, 3, электрические радианы<br>Angles of field weakening at operating points 1, 2, 3, electrical radians | 0,61; 0,3; 0,25 |
| Плотность потока магнитного монополя в рабочих точках 1, 2, 3, Вб/м<br>Magnetic monopole densities at operating points 1, 2, 3, Wb/m | 0,48; 0,63; 1,2 |

В [13] было принято, что сопротивление обмотки возбуждения равно 10,2 Ом. В данном исследовании сопротивление обмотки возбуждения в зависимости от размеров обмотки возбуждения меняется в ходе оптимизации и составляет 10,2 Ом·[43 мм]·[78 мм]/$h_{exc}$/$L_{ex}$. Число витков обмотки возбуждения полагается неизменным и равным 340. Табл. 4 показывает характеристики обмотки якоря.

Для лучшего использования питающего напряжения количество витков обмотки якоря было увеличено, в сравнении с [13], что привело к увеличению высоты паза статора и уменьшению толщины шихтованного ярма статора. Для ограничения увеличения размера паза статора было выбрано меньшее сечение проводников обмотки. Основные характеристики прототипа двигателя, описанного в [13], показаны в левой части табл. 5. Основные характеристики двигателя, полученные после вышеуказанных изменений (начальное приближение для оптимизации), показаны в правой части табл. 5.

По сравнению с конструкцией, описанной в [5], согласно формуле (5), падение магнитодвижущей силы обмотки возбуждения (МДС) на втулке ротора уменьшается за счет увеличения $R_{sleeve}$. С другой стороны, уменьшаются глубина пазов и явнополюсность ротора. Меняется также сопротивление обмотки возбуждения. Кроме того, параметры обмотки якоря для конструкции, используемой в качестве начального приближения для оптимизации, также отличаются от [5], что показано в табл. 4. Как видно из табл. 5, изменение параметров обмотки якоря, показанных в табл. 4, привело к значительному увеличению линейного напряжения до 1303 В для первой рабочей точки. Это значение напряжения значительно превышает максимально допустимое напряжение в цепи постоянного тока инвертора карьерного самосвала и не может быть реализовано на практике. Однако в следующем разделе будет показано, что с помощью целевой функции (4) и метода Нелдера–Мида можно значительно улучшить все основные характеристики ОСД, без превышения предела напряжения 1000 В.

### Оптимизация ОСД с помощью метода Нелдера–Мида

В процессе оптимизации ОСД использовались традиционный алгоритм Нелдера–Мида [22], математическая модель ОСД на основе двухмерной МКЭ-модели, описанная в [13], и целевая функция (4). Процедура оптимизации варьирует 10 параметров ОСД, приведенных в табл. 2. На рис. 4 показано поперечное сечение двигателя и амплитуда магнитной индукции до и после оптимизации в рабочей точке 3 (табл. 1) с максимальным крутящим моментом, что соответствует наиболее насыщенному состоянию магнитопровода; области поперечного сечения с экстремальным уровнем насыщения более 2 Тл выделены черными контурами. Видно, что после оптимизации площадь областей с экстремальным насыщением уменьшилась. В табл. 6 показаны величины варьируемых конструктивных параметров ОСД после оптимизации. На рис. 5 показано изменение в ходе оптимизации таких значений, как общие потери $\langle P_{losses}\rangle$, амплитуда тока якоря в рабочей точке 3 $I_3$, амплитуда линейного напряжения в рабочей точке 1 и значение целевой функции $F$ (4). В табл. 7 сравниваются основные характеристики двигателя до и после оптимизации. Как видно из табл. 6, в рабочих точках 1, 2 и 3 (работа в двигательном режиме) общие потери после оптимизации снижены в 1,09, 1,19 и 1,04 раза, соответственно. После оптимизации пульсации крутящего момента лишь немного уменьшились в рабочей точке 1. Напряжение в рабочей точке 1 уменьшилось в 1,3 раза, поэтому максимальная амплитуда напряжения составляет 988 В, что не превышает

ограничения в 1000 В (3). Также в рабочей точке 3 амплитудное значение тока обмотки якоря уменьшилось с 669 до 601 А. Хотя в начальном приближении из-за увеличения количества витков амплитудное значение тока обмотки якоря намного меньше, чем для серийной машины [13], однако начальное приближение не проходит по ограничению напряжения (3) и, следовательно, не может быть использовано на практике. Использование оптимизации позволило не только снизить линейное напряжение в рабочей точке 1 до допустимого уровня, но и дополнительно снизить ток обмотки якоря.

Поскольку максимальное значение амплитуды тока якоря для оптимизированного ОСД не превышает 650 А, то в инверторе можно использовать IGBT модули FF650R17IE4 вместо модулей FF1000R17IE4, которые применяются в серийно выпускаемом тяговом приводе с ОСД [13]. Стоимость модуля FF1000R17IE4 составляет 840 долларов США, а стоимость модуля FF650R17IE4 в 1,4 раза меньше и составляет 585 долларов США. Цены указаны на сайте производителя IGBT модулей [23]. Таким образом, для девятифазного инвертора экономия только на IGBT модулях составляет (840–585)·9=2295 долларов США. Кроме того, составляющая переменного тока в конденсаторной батарее звена постоянного тока уменьшится в 1,4 раза, что позволит снизить емкость конденсаторной батареи звена постоянного тока, что также приведет к снижению стоимости инвертора.

***Таблица 4.*** *Параметры обмотки якоря, неизменяемые в ходе оптимизации*

***Table 4.*** *Winding parameters invariable during the optimization*

| Параметр/Parameter | Параметры прототипа ОСД, описанного в [13] SHM prototype described in [13] | Начальное приближение для оптимизации New initial design |
|---|---|---|
| Число витков в слое Number of turns per stator armature layer | 5 | 7 |
| Число параллельных ветвей в витке Number of parallel strands per turn of the stator armature coil | 2 | 2 |
| Размеры прямоугольного провода, мм$^2$ Dimensions of armature wire winding, mm$^2$ | 3,15·4,5 | 2,5·4,5 |
| Высота части паза статора, заполненной обмоткой, мм Height of the stator slot part filled with the wire, mm | 36,4 | 41,1 |
| Сопротивление обмотки возбуждения, Ом Excitation winding resistance, Ohm | 10,2 | 16,8 |

***Таблица 5.*** *Сравнение характеристик прототипа двигателя, описанного в [13], и начального приближения, используемого для оптимизации*

***Table 5.*** *Comparison of the characteristics of the motor prototype described in [13] and the characteristics of the new initial design used as the starting point for optimization*

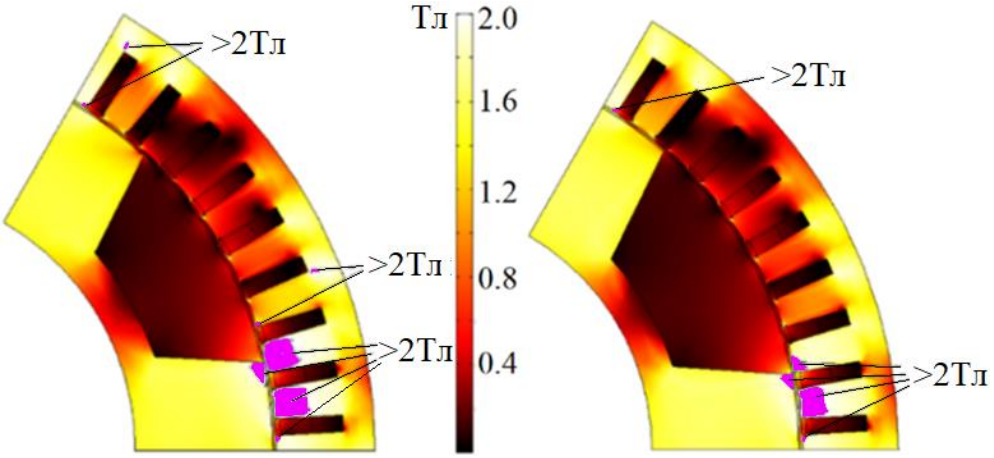
| Величина/Value | Прототип ОСД, описанный в [13] SHM prototype described in [13] | | | | Начальное приближение для оптимизации New initial design (before the optimization) | | | |
|---|---|---|---|---|---|---|---|---|
| Рабочая точка Operating point | 1 | 2 | 3 | Тормозной режим Brake mode | 1 | 2 | 3 | Тормозной режим Brake mode |
| Скорость вращения, об/мин Rotational speed, rpm | 4000 | 1265 | 400 | 1100 | 4000 | 1265 | 400 | 1100 |
| Амплитуда тока, А Current, A ampl | 197 | 408 | 886 | 643 | 142 | 296 | 669 | 485 |
| Механическая мощность, кВт Mechanical power, kW | 370 | 370 | 370 | –540 | 370 | 370 | 370 | –540 |
| Активная мощность, кВт Active power, kW | 412 | 387 | 404 | –508 | 412 | 387 | 405 | –509 |
| КПД, % Efficiency, % | 89,8 | 95,4 | 90,0 | 93,8 | 89,8 | 95,3 | 89,8 | 94,0 |
| Полные потери, кВт Total losses, kW | 41,9 | 18,0 | 41,0 | 32,2 | 42,2 | 18,1 | 42,1 | 32,4 |
| Коэффициент мощности Power factor | 0,99 | 0,82 | 0,91 | –0,65 | 0,99 | 0,81 | 0,88 | –0,62 |
| Амплитуда линейного напряжения, В Line voltage, V ampl | 940 | 472 | 196 | 462 | 1303 | 661 | 272 | 642 |
| Несимметризированные пульсации момента, Н·м Not symmetrized torque ripple, N·m | 71,9 | 61,5 | 24,1 | 42,1 | 71,9 | 62,1 | 24,1 | 43,5 |
| Симметризированные пульсации момента, Н·м Symmetrized torque ripple, N·m | 21,0 | 12,4 | 2,8 | 8,4 | 20,8 | 12,3 | 2,6 | 8,1 |
| Excitation current, A Ток возбуждения, А | 5,6 | 8,1 | 26,3 | 10,7 | 5,5 | 8,1 | 24,8 | 10,8 |
| Магнитная индукция в нешихтованных частях магнитопровода, Тл Flux density in non-laminated parts of the magnetic core, T | 0,59 | 0,77 | 1,46 | 0,77 | 0,59 | 1,04 | 1,65 | 0,98 |

***Таблица 6.*** *Величины варьируемых параметров двигателя после оптимизации*
***Table 6.*** *Varied design parameters of the traction motor after optimization*

| Parameter/Параметр | Optimal design<br>Оптимальная конструкция |
|---|---|
| Толщина корпуса *h*, мм<br>Housing thickness *h*, mm | 32,8 |
| Полная длина пакетов статора $L_{stator}$, мм<br>Total stator stacks length $L_{stator}$, mm | 431 |
| Величина воздушного зазора δ, мм<br>Airgap width *δ*, mm | 2,41 |
| Коэффициент паза ротора $f_{rs}$<br>Rotor slot factor $f_{rs}$ | 1,10 |
| Углы ослабления поля в рабочих точках 1, 2, 3, электрические радианы<br>Angles of field weakening at operating points 1, 2, 3, electrical radians | 0,762; 0,400; 0,364 |
| Плотность потока магнитного монополя в рабочих точках 1, 2, 3, Вб/м<br>Magnetic monopole densities at operating points 1, 2, 3, Wb/m | 0,331; 0,678; 1,139 |

***Таблица 7.*** *Результаты оптимизации*
***Table 7.*** *Optimization results*

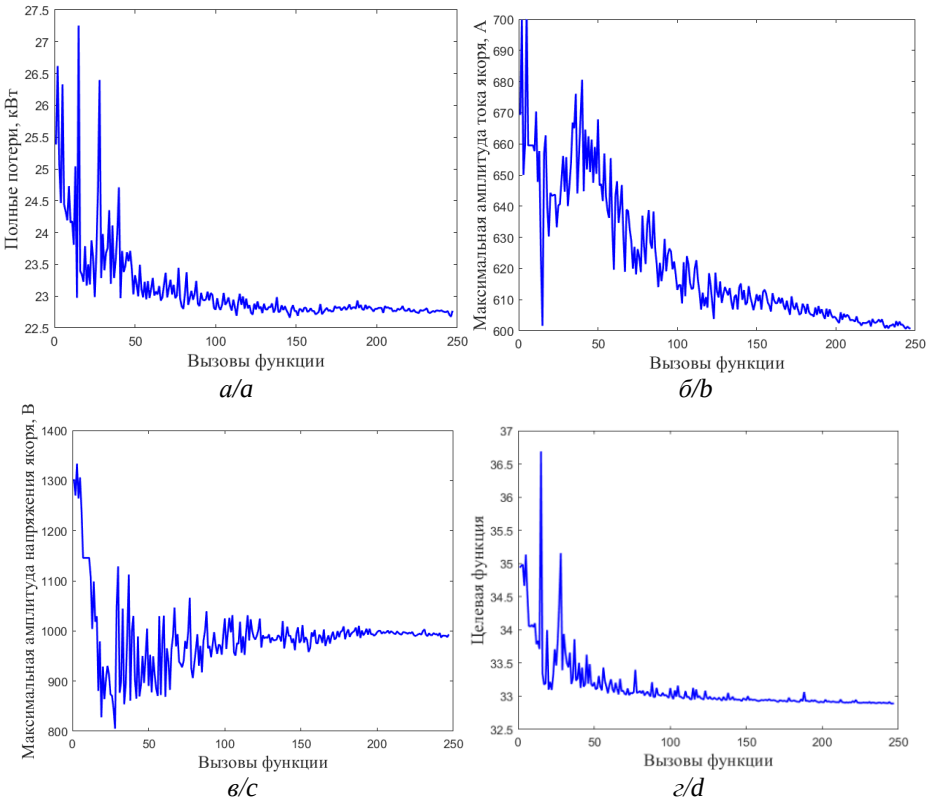
| Величина<br>Value | Начальное приближение до оптимизации<br>New initial design<br>(before the optimization) | | | | После оптимизации<br>After optimization | | | |
|---|---|---|---|---|---|---|---|---|
| Рабочая точка<br>Operating point | 1 | 2 | 3 | Тормозной режим<br>Brake mode | 1 | 2 | 3 | Тормозной режим<br>Brake mode |
| Скорость вращения, об/мин<br>Rotational speed, rpm | 4000 | 1265 | 400 | 1100 | 4000 | 1265 | 400 | 1100 |
| Амплитуда тока якоря, А<br>Armature current, A ampl | 142 | 296 | 669 | 485 | 176 | 255 | 601 | 429 |
| Механическая мощность, кВт<br>Mechanical power, kW | 370 | 370 | 370 | –540 | 370 | 370 | 370 | –540 |
| Механические потери, кВт<br>Mechanical losses, kW | 17,57 | 0,65 | 0,05 | 0,45 | 17,57 | 0,65 | 0,05 | 0,45 |
| Омические потери в обмотке якоря, кВт<br>Conductive armature winding losses, kW | 1,4 | 6,1 | 30,9 | 16,2 | 2,1 | 4,5 | 25,0 | 12,7 |
| Потери в обмотке якоря на вихревые тока, кВт<br>Eddy-current armature winding losses, kW | 5,2 | 2,5 | 1,1 | 4,3 | 6,0 | 2,1 | 1,0 | 3,8 |
| Потери в стали статора, кВт<br>Stator core losses, kW | 15,1 | 7,5 | 2,4 | 9,4 | 10,9 | 5,9 | 2,5 | 8,2 |
| Потери в стали ротора, кВт<br>Rotor core losses, kW | 2,5 | 0,6 | 0,1 | 0,6 | 1,5 | 0,6 | 0,1 | 0,5 |
| Потери в обмотке возбуждения, кВт<br>Excitation losses, kW | 0,4 | 0,8 | 7,5 | 1,4 | 0,5 | 1,5 | 11,9 | 2,0 |
| Активная мощность, кВт<br>Active power, kW | 412 | 387 | 405 | –509 | 408 | 384 | 399 | –514 |
| КПД, %<br>Efficiency, % | 89,8 | 95,3 | 89,8 | 94,0 | 90,5 | 96,1 | 90,1 | 94,9 |
| Полные потери (двигатель), кВт<br>Total losses (motor), kW | 42,2 | 18,1 | 42,1 | 32,4 | 38,7 | 15,2 | 40,5 | 27,6 |
| Коэффициент мощности<br>Power factor | 0,99 | 0,81 | 0,88 | –0,62 | 0,97 | 0,96 | 0,96 | –0,74 |
| Амплитуда линейного напряжения, В<br>Line voltage, V ampl | 1303 | 661 | 272 | 642 | 988 | 632 | 275 | 621 |
| Симметризированные пульсации момента, Н·м<br>Symmetrized torque ripple, N·m | 20,8 | 12,3 | 2,6 | 8,1 | 18,9 | 12,5 | 3,0 | 9,4 |
| Ток возбуждения, А<br>Excitation current, A | 5,5 | 8,1 | 24,8 | 10,8 | 5,5 | 9,5 | 26,6 | 10,8 |
| Магнитная индукция в не шихтованных частях магнитопровода, Тл<br>Flux density in non-laminated parts of the magnetic core, T | 0,59 | 0,77 | 1,46 | 0,77 | 0,48 | 0,98 | 1,65 | 0,91 |




*а/a* *б/b*

***Рис. 4.*** *Поперечное сечение двигателя и величина магнитной индукции; розовым цветом отмечены области с экстремальным уровнем насыщения (>2 Тл): а) до оптимизации; б) после оптимизации; видно, что после оптимизации площадь областей с магнитной индукцией >2 Тл заметно уменьшилась*

***Fig. 4.*** *Motor cross section and the magnitude plot of flux density; black outlines mark the extreme saturation level (>2 T): a) before optimization; b) after optimization; it can be observed that after optimization, the area of regions with flux density >2 T has noticeably decreased*




*а/a* *б/b* *в/c* *г/d*

***Рис. 5.*** *Изменение целевых параметров в ходе оптимизации: а) полные потери <$Pl_{osses}$>; б) максимальная амплитуда тока обмотки якоря; в) максимальная амплитуда напряжения обмотки якоря; г) целевая функция оптимизации F*

***Fig. 5.*** *Variations in the objectives during the optimization: a) total losses <$Pl_{osses}$>; b) maximum current amplitude in the armature winding; c) maximum voltage amplitude in the armature winding; d) objective function F*

**Заключение**

Применение неэффективных методов проектирования одноименнополюсных синхронных двигателей может привести к необходимости значительно завышать установленную мощность силового инвертора в тяговых приложениях, требующих работы в широком диапазоне скоростей с постоянной мощностью. В статье обсуждается новая процедура и результаты оптимизации серийно производимого тягового одноименнополюсного синхронного двигателя с номинальной мощностью 370 кВт с использованием метода Нелдера–Мида. Целевая функция составлена для улучше-

ния таких основных характеристик тягового одноименнополюсного синхронного двигателя, как суммарные потери мощности двигателя и максимальный ток обмотки якоря. При разработке оптимизированной конструкции, которая может быть применена на практике, накладываются необходимые ограничения. В результате оптимизации потери в двигателе и максимальный ток, потребляемый двигателем от инвертора, были значительно снижены. Достигнутое снижение максимального тока позволяет снизить стоимость силовых полупроводниковых модулей инвертора в 1,4 раза, а также позволяет снизить переменную составляющую тока в звене постоянного тока.

*Работа выполнена при поддержке гранта Российского научного фонда (проект № 21-19-00696).*

### СПИСОК ЛИТЕРАТУРЫ

1. Трухнов Л.И. Новые и перспективные разработки ОАО «БелАЗ» – управляющая компания холдинга «БелАЗ-холдинг» – горнякам // Горный информационно-аналитический бюллетень (научно-технический журнал). – 2015. – № S1-2. – С. 34–41.
2. Recent advances in mining haul trucks / W. Koellner, G. Brown, J. Rodriguez, J. Pontt, P. Cortes, H. Miranda // IEEE Transactions on Industrial Electronics. – 2004. – V. 51. – P. 321–329. DOI: 10.1109/TIE.2004.825263
3. Superconducting AC homopolar machines for high-speed applications / S. Kalsi, K. Hamilton, R.G. Buckley, R.A. Badcock // Energies. – 2019. – V. 12. – P. 1–14. DOI: 10.3390/en12010086
4. Homopolar generators: an overview / C. Bianchini, F. Immovilli, A. Bellini, E. Lorenzani, C. Concari, M. Scolari // Proceedings of the 2011 IEEE Energy Conversion Congress and Exposition. – Phoenix, USA, 17–22 September 2011. – P. 1523–1527. DOI: doi.org/10.1109/ECCE.2011.6063962
5. Design optimization of a traction synchronous homopolar motor / V. Dmitrievskii, V. Prakht, A. Anuchin, V. Kazakbaev // Mathematics. – 2021. – V. 9. – P. 1–14. DOI: 10.3390/math9121352
6. A novel critical analysis method of homopolar inductor alternator for preliminary design in capacitor charge power supply / K. Yu, J. Yao, X. Xie, P. Tang // IEEE Transactions on Plasma Science. – 2019. – V. 47. – № 5. – P. 2354–2361. DOI: 10.1109/TPS.2019.2892610.
7. Dual-purpose no-voltage winding design for the bearingless AC homopolar and consequent pole motors / E. Severson, R. Nilssen, T. Undeland, N. Mohan // IEEE Transactions on Industry Applications. – 2015. – V. 51. – № 4. – P. 2884–2895. DOI: 10.1109/TIA.2015.2388852.
8. Design of a 10-MW-Class HTS homopolar generator for wind turbines / J.-S Jeong, D.-K. An, J.-P. Hong, H.-J. Kim, Y.-S. Jo // IEEE Transactions on Applied Superconductivity. – 2017. – V. 27. – № 4. – P. 1–4. DOI: 10.1109/TASC.2017.2669140.
9. Traction induction motor / J. Bernatt, S. Gawron, T. Glinka, A. Polak // Proc. of the 13th International Conference Modern Electrified Transport (MET). – Warsaw, Poland, 5–7 October 2017. – P. 1–5. DOI: 10.1051/matecconf/201818004005
10. Комплект тягового электрооборудования для БелАЗ-90 на базе вентильно-индукторного электродвигателя с независимым возбуждением / А.С. Анучин, М.К. Котельников, В.Н. Остриров, М.М. Лашкевич, М.В. Подлесный, К.В. Мильский, А.С. Тарасов // Труды X международной конференции по автоматизированному электроприводу АЭП. – Новочеркасск: Изд-во ООО «Лик», 2018. – С. 218–224.
11. Cheshmehbeigi H., Afjei E. Design optimization of a homopolar salient-pole brushless DC machine: analysis, simulation, and experimental tests // IEEE Transactions on Energy Conversion. – 2013. – V. 28. – № 2. – P. 289–297. DOI: 10.1109/TEC.2013.2249584.
12. Outer-rotor AC homopolar motors for flywheel energy storage / E. Severson, N. Mohan, R. Nilssen, T. Undeland // Proc. of 7th IET Int. Conf. Power Electron., Mach. Drives (PEMD). – Manchester, U.K., 8–10 April 2014. – P. 1–6. DOI: 10.1049/cp.2014.0345.
13. Traction synchronous homopolar motor: simplified computation technique and experimental validation / V. Dmitrievskii, V. Prakht, A. Anuchin, V. Kazakbaev // IEEE Access. – 2020. – V. 2020. – P. 185112–185120. DOI: 10.1109/ACCESS.2020.3029740
14. Investigation of a two-dimensional analytical model of the homopolar inductor alternator / J. Yang, C. Ye, X. Liang, W. Xu, F. Xiong, Y. Xiang, W. Li // IEEE Transactions on Applied Superconductivity. – 2018. – V. 28. – № 3. – P. 1–5. DOI: 10.1109/TASC.2018.2802480
15. Relationship between homopolar inductor machine and wound-field synchronous machine / C. Ye, J. Yang, F. Xiong, Z.Q. Zhu // IEEE Transactions on Industrial Electronics. – 2020. – V. 67. – P. 919–930. DOI: 10.1109/TIE.2019.2898577
16. Belalahy C., Rasoanarivo I., Sargos F. Using 3D reluctance network for design a three phase synchronous homopolar machine // Proceedings of the 2008 34th Annual Conference of IEEE Industrial Electronics. – Orlando, USA, 10–13 November 2008. – P. 2067–2072. DOI: 10.1109/IECON.2008.4758275
17. FF1000R17IE4, IGBT-Modules, Technical Information, Revision 3.2, Infineon. 2013. URL: https://www.infineon.com/dgdl/Infineon-FF1000R17IE4-DS-v03_02-EN.pdf?fileId=db3a30431ff9881501201dc994a34980 (дата обращения 08.09.2021).
18. Prakht V., Dmitrievskii V., Kazakbaev V. Optimal design of gearless flux-switching generator with ferrite permanent magnets // Mathematics. – 2020. – V. 8. – P. 1–14. DOI: 10.3390/math8020206
19. FF650R17IE4, IGBT-Modules, Technical Information, Revision 3.3, Infineon. 2013. URL: https://www.infineon.com/dgdl/Infineon-FF650R17IE4-DS-v03_03-EN.pdf?fileId=db3a30431ff9881501201dcfe2a54986 (дата обращения 08.09.2021).
20. Cupertino F., Pellegrino G., Gerada C. Design of synchronous reluctance machines with multiobjective optimization algorithms // IEEE Transactions on Industry Applications. – 2014. – V. 50. – P. 3617–3627. DOI: 10.1109/TIA.2014.2312540
21. Krasopoulos C.T., Beniakar M.E., Kladas A.G. Robust optimization of high-speed PM motor design // IEEE Transactions on Magnetics. – 2017. – V. 53. – P. 1–4. DOI: 10.1109/TMAG.2017.2660238
22. Nelder J.A., Mead R. A simplex method for function minimization // The Computer Journal. – 1965. – V. 7. – P. 308–313. DOI: 10.1093/comjnl/7.4.308
23. IGBT Modules. Infineon. URL: https://www.infineon.com/cms/en/product/power/igbt/igbt-modules (дата обращения 08.09.2021).

*Поступила 09.09.2021 г.*

### Информация об авторах

***Прахт В.А.***, кандидат технических наук, доцент кафедры электротехники и электротехнологических систем Уральского Энергетического Института Уральского Федерального Университета.

***Дмитриевский В.А.***, кандидат технических наук, доцент кафедры электротехники и электротехнологических систем Уральского Энергетического Института Уральского Федерального Университета.

***Анучин А.С.***, доктор технических наук, профессор кафедры автоматизированного электропривода Национального исследовательского университета «МЭИ».

***Казакбаев В.М.***, кандидат технических наук, доцент кафедры электротехники и электротехнологических систем Уральского Энергетического Института Уральского Федерального Университета.

UDC 621.313.323

# APPLICATION OF THE NELDER–MEAD METHOD FOR OPTIMIZING A SYNCHRONOUS HOMOPOLAR MOTOR FOR A MINING DUMP TRUCK

**Vladimir A. Prakht**[1],
va.prakht@urfu.ru

**Vladimir A. Dmitrievskii**[1],
vladimir.dmitrievsky@urfu.ru

**Alecksey S. Anuchin**[2],
anuchinas@mpei.ru

**Vadim M. Kazakbaev**[1],
adim.kazakbaev@urfu.ru

[1] Ural Federal University,
19, Mira street, Yekaterinburg, 620002, Russia.

[2] Moscow Power Engineering Institute,
14, Krasnokazarmennaya street, Moscow, 111250, Russia.

***The relevance*** *of the study is in the increasing need for the use of mining dump trucks with a diesel-electric (hybrid) drive for the development of minerals. Improving the operational and cost characteristics of the electric drive of mining dump trucks helps to reduce costs in the development of minerals.*
***The main aim*** *of the study is to find an effective approach to optimizing a synchronous homopolar motor for driving the rear wheels of a mining dump truck, which makes it possible to solve the problem of the high demand for computing resources when simulating a three-dimensional magnetic field of the motor; develop the recommendations for the design of a synchronous homopolar motor with an excitation winding on the stator; apply the optimization to reduce power losses and maximum motor current for a given traction characteristic of the drive, and to reduce the current rating and cost of the semiconductor inverter module of the electric drive of a mining dump truck with the type of motor under consideration.*
***Object*** *of the research is a design of a six-pole nine-phase synchronous homopolar motor with an excitation winding on the stator with a power rating of 370 kW.*
***Methods:*** *derivative-free optimization method; equivalent circuit method; mathematical modeling; two-dimensional finite element method.*
***Results.*** *A novel approach to optimization of a synchronous homopolar motor is proposed. This approach is effective from the point of view of the accuracy of calculating the characteristics and computational costs. As a result of optimization, the motor losses and the maximum current required by the motor from the inverter have been significantly reduced. The achieved reduction of the motor current allows reducing the cost of the semiconductor modules of the inverter by 1,4 times (by 2295 United States dollars), and also allows reducing the alternating component in the current of the direct current link of the inverter by the same amount.*

***Key words:***
*Mining dump truck, Nelder–Mead method, synchronous homopolar motor, optimal design, traction motor, traction drives.*

*The research was performed with the support of the Russian Science Foundation grant (Project No. 21-19-00696).*

## REFERENCES

1. Trukhnov L.I. New and promising developments of «BelAZ» – the managing company of the holding «BelAZ-holding» – for miners. *Mining information and analytical bulletin (scientific and technical journal)*, 2015, no. S1-2, pp. 34–41. In Rus.
2. Koellner W., Brown G., Rodriguez J., Pontt J., Cortes P., Miranda H. Recent advances in mining haul trucks. *IEEE Transactions on Industrial Electronics*, 2004, vol. 51, pp. 321–329. DOI: 10.1109/TIE.2004.825263
3. Kalsi S., Hamilton K., Buckley R.G., Badcock R.A. Superconducting AC Homopolar machines for high-speed applications. *Energies*, 2019, vol. 12, pp. 1–14. DOI: 10.3390/en12010086
4. Bianchini C., Immovilli F., Bellini A., Lorenzani E., Concari C., Scolari M. Homopolar generators: an overview. *Proc. of the 2011 IEEE Energy Conversion Congress and Exposition.* Phoenix, USA, 17–22 September 2011. pp. 1523–1527, DOI: 10.1109/ECCE.2011.6063962
5. Dmitrievskii V., Prakht V., Anuchin A., Kazakbaev V. Design optimization of a traction synchronous homopolar motor. *Mathematics*, 2021, vol. 9, pp. 1–14. DOI: 10.3390/math9121352
6. Yu K., Yao J., Xie X., Tang P. A novel critical analysis method of homopolar inductor alternator for preliminary design in capacitor charge power supply. *IEEE Transactions on Plasma Science*, 2019, vol. 47, no. 5, pp. 2354–2361. DOI: 10.1109/TPS.2019.2892610.
7. Severson E., Nilssen R., Undeland T., Mohan N. Dual-purpose no-voltage winding design for the bearingless AC homopolar and consequent pole motors. *IEEE Transactions on Industry Applications*, 2015, vol. 51, no. 4, pp. 2884–2895. DOI: 10.1109/TIA.2015.2388852
8. Jeong J.-S., An D.-K., Hong J.-P., Kim H.-J., Jo Y.-S. Design of a 10-MW-Class HTS homopolar generator for wind turbines. *IEEE Transactions on Applied Superconductivity*, 2017, vol. 27, no. 4, pp. 1–4. DOI: 10.1109/TASC.2017.2669140
9. Bernatt J., Gawron S., Glinka T., Polak A. Traction induction motor. *Proc. of the 13th International Conference Modern Electrified Transport (MET)*. Warsaw, Poland, 5–7 October 2017. pp. 1–5. DOI: 10.1051/matecconf/201818004005
10. Anuchin A.S., Kotelnikov M.K., Ostrirov V.N., Lashkevich M.M., Podlesny M.V., Milsky K.V., Tarasov A.S. Komplekt tyagovogo elektrooborudovaniya dlya BelAZ-90 na baze ventilno-induktornogo elektrodvigatelya s nezavisimym vozbuzhdeniem [A set of traction electrical equipment for BelAZ-90 based on a synchronous homopolar electric motor with independent excitation]. *Trudy X Mezhdunarodnoy konferentsii po*

*avtomatizirovannomu elektroprivodu AEP* [Proc. of the X international conference on the automated electric drive AEP 2018]. Novocherkassk, LIK Publ., 2018. pp. 218–224.
11. Cheshmehbeigi H., Afjei E. Design optimization of a homopolar salient-pole brushless DC machine: Analysis, simulation, and experimental tests. *IEEE Transactions on Energy Conversion*, 2013, vol. 28, no. 2, pp. 289–297. DOI: 10.1109/TEC.2013.2249584.
12. Severson E., Mohan N., Nilssen R., Undeland T. Outer-rotor AC homopolar motors for flywheel energy storage. *Proc. of 7th IET Int. Conf. Power Electron., Mach. Drives (PEMD)*. Manchester, U.K., 2014. pp. 1–6. DOI: 10.1049/cp.2014.0345
13. Dmitrievskii V., Prakht V., Anuchin A., Kazakbaev V. Traction synchronous homopolar motor: simplified computation technique and experimental validation. *IEEE Access*, 2020, vol. 8, pp. 185112–185120. DOI: doi.org/10.1109/ACCESS.2020.3029740
14. Yang J., Ye C., Liang X., Xu W., Xiong F., Xiang Y., Li W. Investigation of a two-dimensional analytical model of the homopolar inductor alternator. *IEEE Transactions on Applied Superconductivity*, 2018, vol. 28, pp. 1–5. DOI: 10.1109/TASC.2018.2802480
15. Ye C., Yang J., Xiong F., Zhu Z.Q. Relationship between homopolar inductor machine and wound-field synchronous machine. *IEEE Transactions on Industrial Electronics*, 2020, vol. 67, pp. 919–930. DOI: 10.1109/TIE.2019.2898577
16. Belalahy C., Rasoanarivo I., Sargos F. Using 3D reluctance network for design a three phase synchronous homopolar machine. *Proc. of the 2008 34th Annual Conference of IEEE Industrial Electronics*. Orlando, USA, 10–13 November 2008. pp. 2067–2072. DOI: 10.1109/IECON.2008.4758275
17. *FF1000R17IE4, IGBT-Modules, Technical Information, Revision 3.2, Infineon*. November 2013. Available at: https://www.infineon.com/dgdl/Infineon-FF1000R17IE4-DS-v03_02-EN.pdf?fileId=db3a30431ff9881501201dc994a34980 (accessed 8 September 2021).
18. Prakht V., Dmitrievskii V., Kazakbaev V. Optimal design of gearless flux-switching generator with ferrite permanent magnets. *Mathematics*, 2020, vol. 8, pp. 1–14. DOI: 10.3390/math8020206
19. *FF650R17IE4, IGBT-Modules, Technical Information, Revision 3.3, Infineon*. November 2013. Available at: https://www.infineon.com/dgdl/Infineon-FF650R17IE4-DS-v03_03-EN.pdf?fileId=db3a30431ff9881501201dcfe2a54986 (accessed 8 September 2021).
20. Cupertino F., Pellegrino G., Gerada C. Design of synchronous reluctance machines with multiobjective optimization algorithms. *IEEE Transactions on Industry Applications*, 2014, vol. 50, pp. 3617–3627. DOI: 10.1109/TIA.2014.2312540
21. Krasopoulos C.T., Beniakar M.E., Kladas A.G. Robust optimization of high-speed PM motor design. *IEEE Transactions on Magnetics*, 2017, vol. 53, pp. 1–4. DOI: 10.1109/TMAG.2017.2660238
22. Nelder J.A., Mead R.A. Simplex method for function minimization. *The Computer Journal*, 1965, vol. 7, pp. 308–313. DOI: 10.1093/comjnl/7.4.308
23. *IGBT Modules. Infineon*. Available at: https://www.infineon.com/cms/en/product/power/igbt/igbt-modules (accessed 8 September 2021).

*Received: 09 September 2021.*

**Information about the authors**

***Vladimir A. Prakht***, Cand. Sc., associate professor, Ural Federal University.
***Vladimir A. Dmitrievskii***, Cand Sc., associate professor, Ural Federal University.
***Alecksey S. Anuchin***, Dr. Sc., full professor, Moscow Power Engineering Institute.
***Vadim M. Kazakbaev***, Cand Sc., associate professor, Ural Federal University.

УДК 553.411:546.22

# ИЗОТОПНАЯ ХАРАКТЕРИСТИКА СЕРЫ АРСЕНОПИРИТА ИЗ ЦЕНТРАЛЬНОЙ ЧАСТИ ЗАЛЕЖИ МЕСТОРОЖДЕНИЯ ЧЕРТОВО КОРЫТО (ПАТОМСКОЕ НАГОРЬЕ)

**Синкина Екатерина Андреевна**[1],
vea@tpu.ru

**Гаврилов Роман Юрьевич**[1],
gavrilovry@tpu.ru

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

***Актуальность.*** *Месторождение Чертово Корыто располагается в пределах Ленской золотоносной провинции, в которой сосредоточенны крупные по запасам месторождения золота (Сухой Лог, Вернинское, Высочайшее, Ожерелье и др.). Изучению этой провинции уделено много внимания, что отражено в огромном числе публикаций. Несмотря на это, единое представление о происхождении месторождений золота, образованных в черносланцевых толщах Бодайбинского прогиба, отсутствует. Дискуссионным остается вопрос об источнике полезного компонента и выявлении механизма его транспортировки, перераспределения и концентрирования. Ввиду этого становится актуальным изучение изотопных отношений серы сульфидов для определения возможного источника благородного металла. В месторождении Чертово Корыто изотопные отношения серы сульфидов изучены в ограниченном количестве и не отражают изменения этого параметра на глубину и по простиранию рудной залежи. В силу малоизученности этот объект является интересным для исследований в области изотопной геологии.*

***Цель*** *– выявление возможных источников рудного вещества по результатам изотопных исследований серы арсенопирита.*

***Объектом*** *исследования является арсенопирит из центральной части рудной залежи.*

***Методы.*** *Масс-спектрометрические измерения с использованием газового масс-спектрометра.*

***Результаты.*** *Исследования показали выдержанность изотопного состава серы арсенопирита (–3,8‰…+4,3 ‰) на глубине, что свидетельствует об однородном источнике серы в период рудообразования. Приближенные при этом к метеоритному стандарту значения указывают на эндогенный источник рудообразующих флюидов. Полученные данные согласуются с изотопным составом серы сульфидов различных по происхождению месторождений золота, образованных в сланцевом и ином субстратах.*

***Ключевые слова:***
*Изотопы, сера, сульфиды, арсенопирит, золоторудное месторождение, черные сланцы.*

## Введение

На сегодняшний день вопрос о возможных источниках рудного вещества в золотых месторождениях, образованных в черносланцевых толщах, является актуальным. Это связанно с существованием различных представлений о механизмах образования таких объектов.

Согласно одной из теорий (метаморфогенно-гидротермальной) рудные зоны формируются в процессе метаморфизма изначально обогащенных золотом осадочных пород [1–5]. Представление о магматогенно-гидротермальном механизме подразумевает связь происхождения металлоносных флюидов с гранитным магматизмом [6–9] или с мантийными умеренно щелочными базальтовыми расплавами [10–12]. Ряд исследователей доказывают многоэтапность накопления и концентрирования металлов, делая акцент на преобладание породных источников золота [13]. Есть точка зрения о множественных источниках благородного металла, сосредоточенного в рудах одного месторождения. Предполагается совместный вклад мантийного субстрата, коровых расплавов и породных источников [14, 15]. Стоит при этом отметить, что авторы, предлагающие и доказывающие тот или иной вариант, нередко меняют свою точку зрения по причине появления новых фактов.

В связи с этим исследования в области «источников рудного вещества» активно продолжаются, о чем свидетельствуют современные научные публикации [16–20].

Наиболее информативным, по мнению многих исследователей, является изотопный анализ состава серы сульфидов [21–24].

Известно, что в восстановительной среде в интервале температур 400–200 °С невозможна эффективная транспортировка благородного металла без участия серы [25]. Кроме того, наличие в рудах многих месторождений субмикроскопического золота, сингенетичного с пиритом и арсенопиритом [26–32], а также тесная пространственно-временная связь золота с сульфидной минерализацией дает основание предполагать общность происхождения двух элементов.

Авторами многих публикаций при этом отмечается важность прослеживания изменений изотопного состава серы сульфидов в пространстве и времени для получения изотопно-геохимической зональности рудных тел, залежей, месторождений [16, 17, 32].

В связи с имеющимися разногласиями и противоречиями накопление новых данных по изотопным отношениям серы сульфидов золотых месторождений, образованных в черных сланцах, остается актуальным.

В фокус данного исследования, несомненно, попадает месторождение Чертово Корыто. Изотопные исследования серы сульфидов в месторождении Чертово Корыто проведены фрагментарно и в ограничен-

ном количестве. Изотопы серы определены в различных генерациях пирита, арсенопирита, пирротина и в галените (18 проб). Пробы были отобраны из рудных интервалов залежи. Изотопные отношения серы в ранних и поздних сульфидах изменяются в интервале –3,8…+4,7 ‰ [32].

### Геологическая позиция и геологическое строение месторождения Чертово Корыто. Характер арсенопиритовой минерализации

Месторождение Чертово Корыто расположено в Ленской золотоносной провинции, находящейся в зоне сочленения Байкальской горной системы и Сибирской платформы (рис. 1). Главным элементом провинции является Чуйско-Тонодско-Нечерский антиклинорий. На его территории расположено несколько рудных узлов, в том числе Кевактинский рудный узел, связанный с Тонодским поднятием. Узел представляет собой крупный тектонически нарушенный блок, в пределах которого расположен исследуемый объект (рис. 1).

Рудная зона локализована в пределах михайловской свиты раннепротерозойского возраста и приурочена к висячему боку складчато-разломной области, контролируемой Амандракским разломом (рис. 2) [33]. Мощность зоны порядка 150 м, протяженность – 1,5 км. Михайловская свита характеризуется переслаиванием песчаников различной зернистости, алевролитов и аргиллитов. Последние занимают подчиненное положение (5–7 %). Вся толща осадочных пород была подвержена процессам регионального метаморфизма.

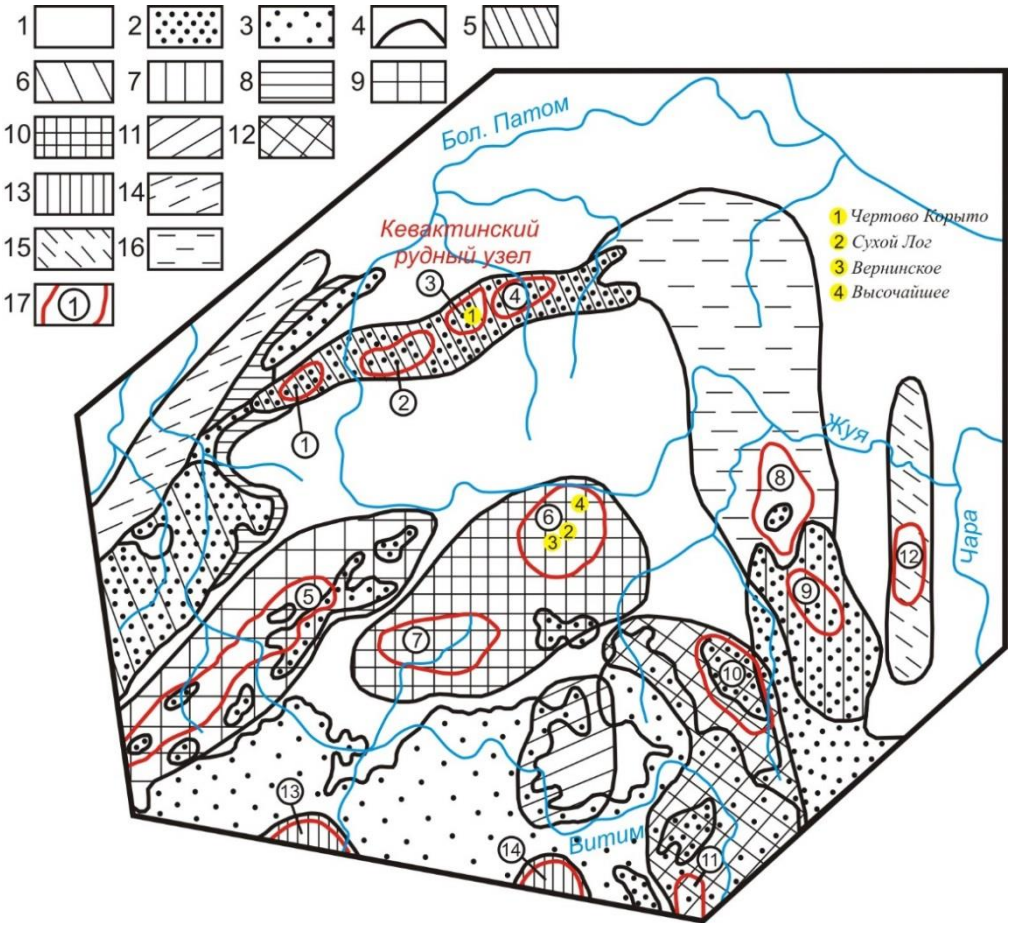



***Рис. 1.*** *Схематическая карта металлогенического районирования Патомского нагорья [34, с дополнениями авторов]: 1 – складчатый чехол (RF-PZ); 2 – выходы фундамента (до RF); 3 – гранитоиды (PZ); 4 – границы рудных районов; 5–16 – рудные районы: 5 – Тонодский, 6 – Чуйский, 7 – Нечерский, 8 – Витимский, 9 – Мамский, 10 – Бодайбинский, 11 – Синюгинский; 12 – Нечеро-Жуинский, 13 – Муйский, 14 – Малочуйский, 15 – Джелиндинский, 16 – Патомо-Нечерский; 17 – рудные узлы: 1 – Туюканский, 2 – Хайвергинский, 3 – Кевактинский, 4 – Амандракский, 5 – Мамская слюдоносная полоса, 6 – Кропоткинский, 7 – Артемовский, 8 – Балаганах-Бульбухтинский, 9 – Ченчинский, 10 – Атычах-Бираинский, 11 – Казбекский, 12 – Бестяхский, 13 – Додыхтинский, 14 – Чаяндринский*

***Fig. 1.*** *Schematic map of metallogenic zoning of the Patom Upland [34, with additions of the authors]: 1 – folded cover (RF-PZ); 2 – foundation outlets (up to RF); 3 – granitoids (PZ); 4 – boundaries of ore districts; 5–16 – ore districts: 5 – Tonodskiy, 6 – Chuyskiy, 7 – Necherskiy, 8 – Vitimskiy, 9 – Mamskiy, 10 – Bodaybinskiy, 11 – Sinyuginskiy; 12 – Nechero-Zhuinskiy, 13 – Muyskiy, 14 – Malochuyskiy, 15 – Dzhelindinskiy, 16 – Patomo-Necherskiy; 17 – ore nodes: 1 – Tuyukanskiy, 2 – Khayverginskiy, 3 – Kevaktinskiy, 4 – Amandrakskiy, 5 – Mamskaya mica-bearing band, 6 – Kropotkinskiy, 7 – Artemovskiy, 8 – Balaganakh-Bulbukhtinskiy, 9 – Chenchinskiy, 10 – Atychakh-Birainskiy, 11 – Kazbekskiy, 12 – Bestyakhskiy, 13 – Dodykhtinskiy, 14 – Chayandrinskiy*

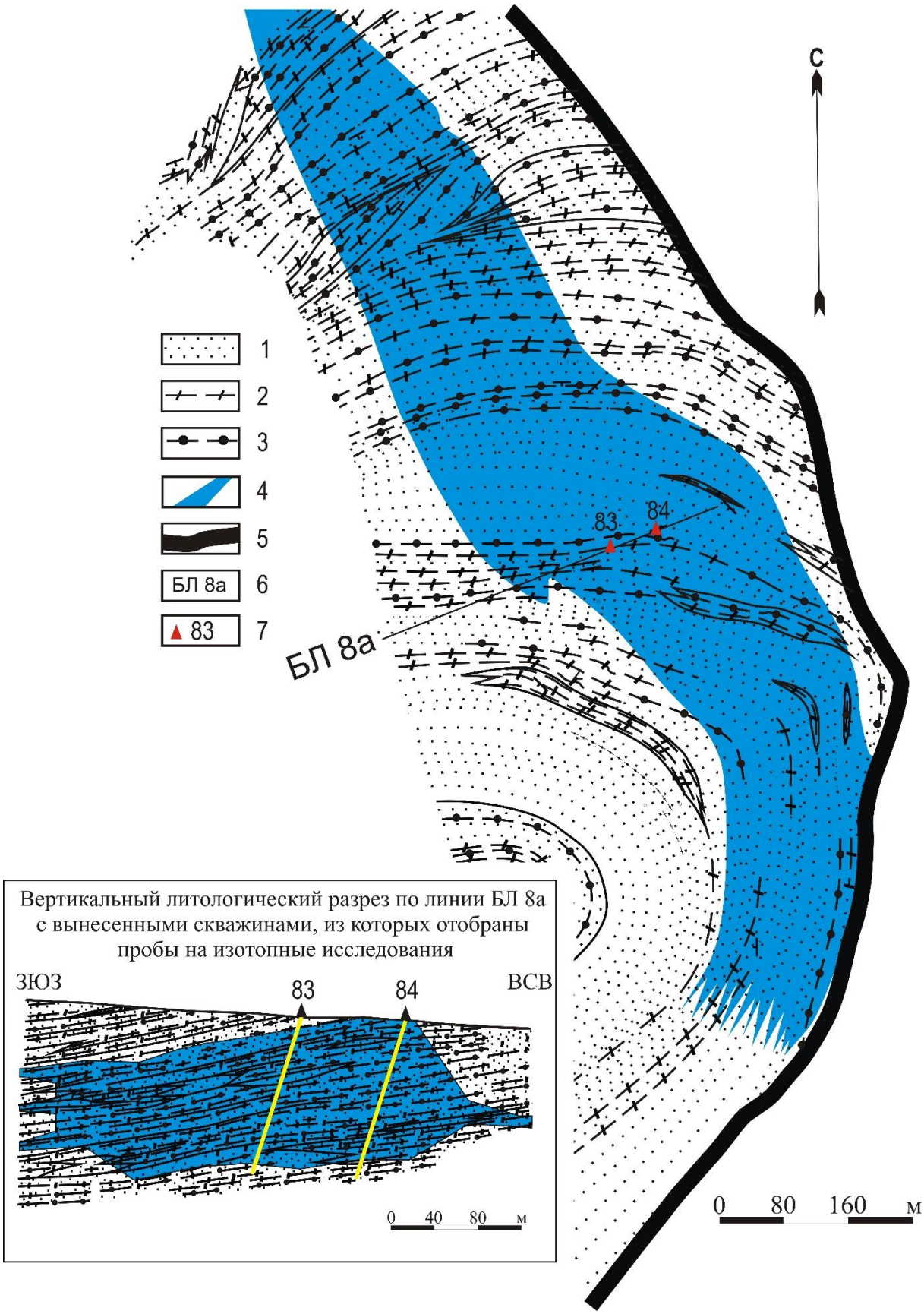



***Рис. 2.*** *Геологическое строение месторождения Чертово Корыто: 1) песчаники; 2) алевролиты; 3) аргиллиты; 4) рудная залежь; 5) разлом; 6) буровая линия 8а; 7) скважина и ее номер*

***Fig. 2.*** *Geological structure of the Chertovo Koryto deposit: 1) sandstones; 2) siltstones; 3) mudstones; 4) ore deposit; 5) fault; 6) drill line 8a; 7) well and its number*

По результатам предшествующих исследований геохимическое поле месторождения Чертово Корыто характеризуется аномальными содержаниями мышьяка [35]. Элемент образует выдержанный ореол по всему объёму рудной залежи и за ее пределами. Наличие такой контрастной аномалии обусловлено присутствием в рудах большого количества арсенопирита.

Ранее авторами статьи был детально изучен вещественный состав руд месторождения [36, 37] и выявлено, что в рудах арсенопирит представлен двумя генерациями, различающимися химическим составом, физическими свойствами и пространственным расположением.

Арсенопирит I повсеместно развит в углеродистых сланцах. Образует как одиночные, так и сросшиеся кристаллы короткопризматической и удлиненно-призматической формы размером до 0,5 см. В арсенопирите I в виде механических включений размером до 0,5 мм отмечается самородное золото I. Его среднее содержание в сульфиде составляет 6,3 г/т.

Арсенопирит II отмечается в кварцевых жилах и прожилках в форме зернистых масс с характерной катакластической структурой. В виде механических включений размером до 0,2 мм в арсенопирите II отмечается самородное золото II [36].

Арсенопирит I и арсенопирит II входят в состав продуктивных золотосодержащих минеральных комплексов.

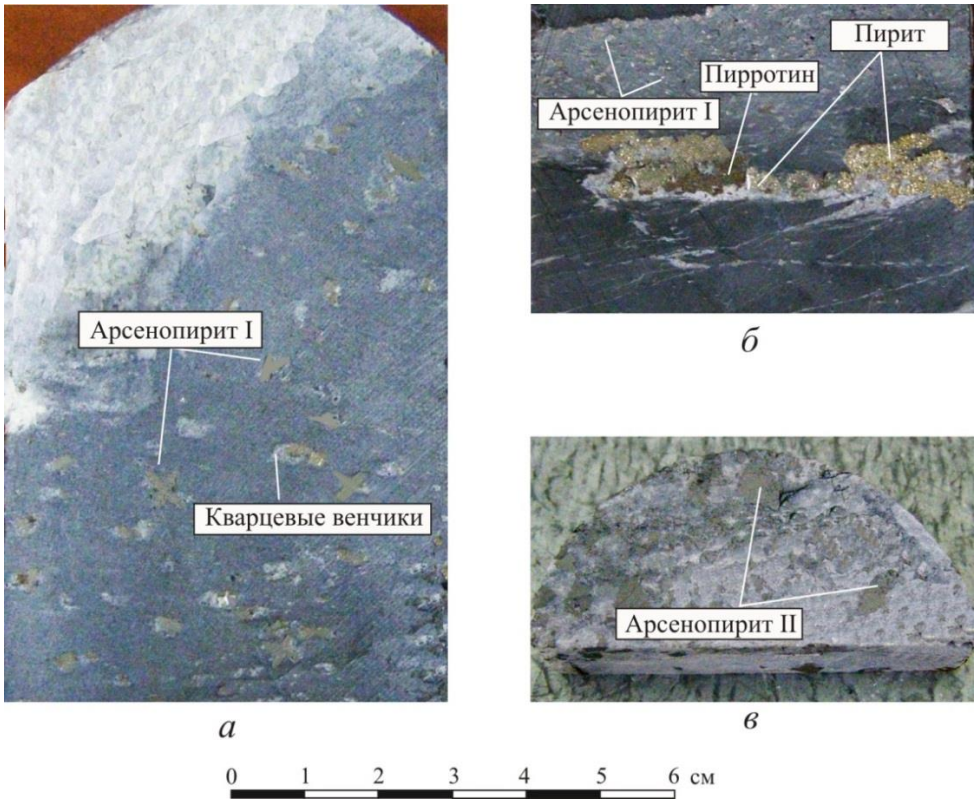



***Рис. 3.*** *Арсенопиритовая минерализация месторождения Чертово Корыто: а) метакристаллы арсенопирита I, рассеянные в породе, местами обрамленные «кварцевыми венчиками»; б) отдельные метакристаллы арсенопирита I и кварц-карбонат-пирит-пирротиновый прожилок; в) плотные зернистые скопления арсенопирита II в относительно мощных жилах кварц-карбонатного состава*

***Fig. 3.*** *Arsenopyrite mineralization of the Chertovo Koryto deposit: a) arsenopyrite I metacrystals scattered in the rock, sometimes framed by «quartz corollas»; b) separate arsenopyrite I metacrystals and quartz-carbonate-pyrite-pyrrhotite veins; c) dense granular accumulations of arsenopyrite II in relatively powerful veins of quartz-carbonate composition*

#### Материал для исследования. Методы исследования

Материалом для исследования является арсенопирит двух генераций, отобранный из центральной части рудного тела из скважин 83 и 84 буровой линии 8а (рис. 2). Арсенопирит отбирался вручную под бинокуляром из протолочек с учетом генетической принадлежности.

Изотопные исследования проведены в лаборатории изотопно-аналитической геохимии ИГМ СО РАН г. Новосибирск (аналитики В.Н. Реутский, О.П. Изох, М.Н. Колбасова).

Пробы сульфида для анализа представляли собой монофракции весом не менее 100 мг. Истертую пробу смешивали с толченым кварцем и пентаксидом ванадия. Далее пробу окисляли в вакуумированном реакторе из плавленого кварца при температуре 850 °С в течение 30 минут. Исследования проведены в газовом масс-спектрометре Delta V Advantage в режиме двойного напуска. Подготовка проб и масс-спектрометрические измерения контролировались набором образцов. Воспроизводимость значений с погрешностью не более 0,1 ‰. Всего проанализировано 33 пробы.

### Результаты и обсуждение

Результаты исследования представлены в таблице.

Интерпретируя изотопные отношения серы сульфидов следует понимать и учитывать, что в рудообразующую систему элемент (сера) может поступать из различных источников и в различных пропорциях. Поэтому сера сульфидов любых промышленно-генетических месторождений золота, имеющая множественный источник, характеризуется значительным разбросом $\delta^{34}S$ [28, 31]. При гомогенном однородном источнике сера демонстрирует относительно узкий диапазон $\delta^{34}S$ [7, 17, 18].

Из приведенных данных отчетливо видно, что в центральной части рудного тела изотопные отношения серы арсенопирита I изменяются в узких пределах от +4,3 ‰ до +0,1 ‰ и приближены к метеоритному стандарту. При этом отличные значения имеет изотопный состав серы арсенопирита II (от +1,3 до –3,8 ‰). В целом для продуктивных стадий минералообразования характерны выдержанные отношения изотопов серы арсенопиритов на глубину всей рудной залежи, что говорит об однородном источнике серы в период рудообразования. Отличающиеся значения изотопного состава серы арсенопиритов, вероятно, связаны с процессами смешения осадочной и ювенильной серы в различных пропорциях. Полученные данные не противоречат, а подтверждают ранее проведенные исследования [32], согласно которым для раннего пирротина, распространенного в виде мелкой вкрапленности в метасоматически преобразованных сланцах михайловской свиты, характерны более положительные значения $\delta^{34}S$ (+6,9 +7,1 ‰). То есть для его образования сера активно заимствовалась из вмещающих пород, а также поступала из дополнительного, предположительно, глубинного источника.

На территории Бодайбинского района локализовано много золоторудных месторождений (рис. 1). Исследуемый объект располагается на удалении (около 100 км к северу) от крупного месторождения Сухой Лог и других объектов (Вернинское, Высочайшее и др.). Все месторождения, несомненно, имеют общие черты и в то же время отличительные особенности. В частности, изотопные отношения серы сульфидов в рудах месторождений Вернинское, Сухой Лог, Высочайшее отличаются от изотопных отношений сульфидов в месторождении Чертово Корыто (рис. 4). Они имеют более положительные значения, т. е. обогащены тяжелым изотопом. Изменение значений укладывается в интервал +5…+12 ‰. При этом за пределами рудных зон, согласно данным автора, $\delta^{34}S$ достигает +20 ‰ [17]. Возможно, различающиеся значения изотопного состава серы связаны с различным количественным привносом элемента эндогенной природы в рудообразующую систему.

***Таблица.*** *Изотопные отношения серы арсенопирита из центральной части рудной залежи месторождения Чертово Корыто*

***Table.*** *Isotopic ratios of arsenopyrite sulphur from ore deposit central part of Chertovo Koryto deposit*

| Минерал<br>Mineral | Глубина, м<br>Depth, m | $\delta^{34}S$, ‰ (CDT) | Минерал<br>Mineral | Глубина, м<br>Depth, m | $\delta^{34}S$, ‰ (CDT) |
|---|---|---|---|---|---|
| Арсенопирит I<br>Arsenopyrite I | 23,2 | +1,9 | Арсенопирит I<br>Arsenopyrite I | 112,0 | +0,1 |
| Арсенопирит I<br>Arsenopyrite I | 43,9 | +2,4 | **Арсенопирит II<br>Arsenopyrite II** | 119,7 | +0,9 |
| **Арсенопирит II<br>Arsenopyrite II** | 44,0 | +0,9 | **Арсенопирит II<br>Arsenopyrite II** | 121,0 | +1,3 |
| **Арсенопирит II<br>Arsenopyrite II** | 52,8 | –3,8 | Арсенопирит I<br>Arsenopyrite I | 121,2 | +0,9 |
| Арсенопирит I<br>Arsenopyrite I | 59,5 | +4,1 | Арсенопирит I<br>Arsenopyrite I | 124,0 | +1,3 |
| Арсенопирит I<br>Arsenopyrite I | 60,5 | +2,2 | **Арсенопирит II<br>Arsenopyrite II** | 126,0 | +0,2 |
| Арсенопирит I<br>Arsenopyrite I | 63,0 | +0,4 | Арсенопирит I<br>Arsenopyrite I | 126,5 | +2,5 |
| **Арсенопирит II<br>Arsenopyrite II** | 63,1 | –3,0 | Арсенопирит I<br>Arsenopyrite I | 128,3 | +0,8 |
| Арсенопирит I<br>Arsenopyrite I | 75,9 | +0,6 | Арсенопирит I<br>Arsenopyrite I | 129,8 | +2,2 |
| **Арсенопирит II<br>Arsenopyrite II** | 79,4 | +1,3 | **Арсенопирит II<br>Arsenopyrite II** | 146,0 | +0,6 |
| **Арсенопирит II<br>Arsenopyrite II** | 83,4 | –2,5 | Арсенопирит I<br>Arsenopyrite I | 149,4 | +0,6 |
| Арсенопирит I<br>Arsenopyrite I | 85,2 | +0,1 | Арсенопирит I<br>Arsenopyrite I | 153,3 | +4,3 |
| Арсенопирит I<br>Arsenopyrite I | 85,0 | +2,8 | Арсенопирит I<br>Arsenopyrite I | 155,3 | +3,3 |
| Арсенопирит I<br>Arsenopyrite I | 87,2 | +2,7 | Арсенопирит I<br>Arsenopyrite I | 155,4 | +2,5 |
| **Арсенопирит II<br>Arsenopyrite II** | 90,0 | –2,4 | Арсенопирит I<br>Arsenopyrite I | 167,4 | +0,3 |
| Арсенопирит I<br>Arsenopyrite I | 91,65 | +1,2 | Арсенопирит I<br>Arsenopyrite I | 182,9 | +2,5 |
| Арсенопирит I<br>Arsenopyrite I | 99,4 | +0,8 | | | |

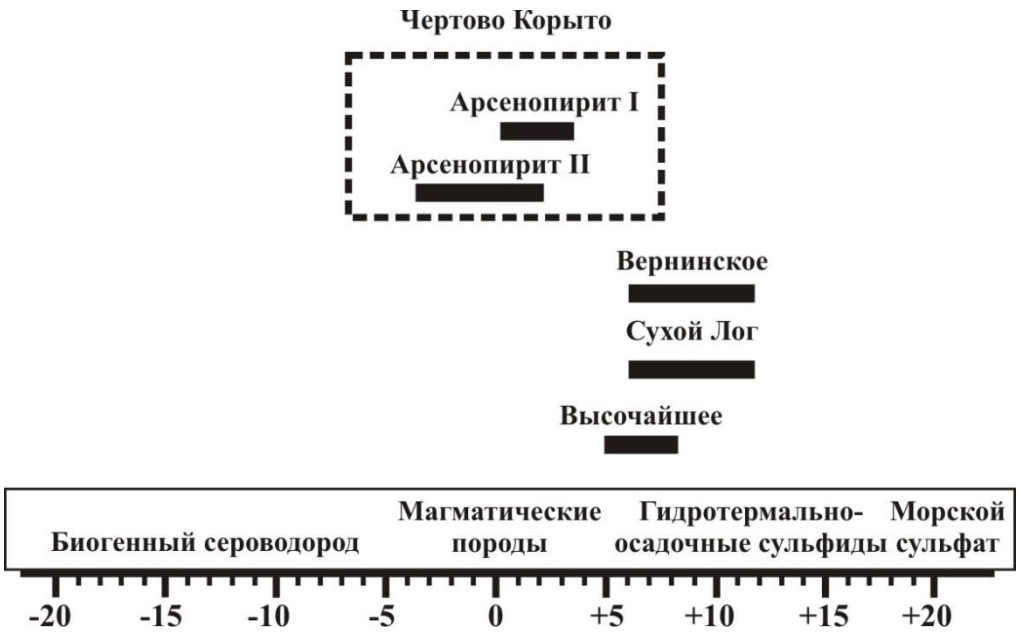



***Рис. 4.*** *Изотопные отношения серы сульфидов в рудах золоторудных месторождений Бодайбинского района [17, с дополнениями авторов]*

***Fig. 4.*** *Isotopic ratios of sulfur sulfides in the ores of gold deposits of the Bodaibinsky district [17, with additions by the authors]*

Существенно различающиеся изотопные отношения серы в сульфидах из руд и вмещающих пород обусловлены поступлением существенных объемов серы и золота в составе эндогенных флюидов. Аналогичные закономерности отмечаются во многих золоторудных месторождениях, локализованных в различных субстратах (терригенном, вулканогенном и др.) [7, 16–22].

### Выводы

Полученные в рамках проведенного исследования результаты показали выдержанность изотопного состава серы арсенопирита (–3,8…+4,3 ‰) по глубине, что свидетельствует об однородном источнике серы в период рудообразования. Более положительные значения $\delta^{34}S$ (+6,9 +7,1 ‰) ранних (дорудных) сульфидов указывают на активное заимствование серы из вмещающих пород и возможное поступление ее из глубинных источников. Отличие значений $\delta^{34}S$ ранних и поздних сульфидов связано с процессами смешения в различных соотношениях серы эндогенного и экзогенного генезиса.

Изотопный состав серы сульфидов в рудах месторождения Чертово Корыто демонстрирует относительно узкий диапазон $\delta^{34}S$, что характерно для золоторудных месторождений Бодайбинского района. Больший разброс значений свойственен сере сульфидов из нерудных интервалов.

### СПИСОК ЛИТЕРАТУРЫ

1. Буряк В.А. Метаморфогенно-гидротермальный тип промышленного золотого оруденения. – М.: Наука, 1975. – 45 с.
2. Буряк В.А. Метаморфизм и рудообразование. – М.: Недра, 1982. – 256 с.
3. Буряк В.А., Хмелевская Н.М. Сухой Лог – одно из крупнейших золоторудных месторождений мира (генезис, закономерности размещения оруденения, критерии прогнозирования). – Владивосток: Дальнаука, 1997. – 156 с.
4. Gold mineralisation and orogenic metamorphism in the Lena province of Siberia as assessed from Chertovo Koryto and Sukhoi Log deposits / M.A. Yudovskaya, V.V. Distler, V.Yu. Prokofiev, N.N. Akinfiev // Geoscience Frontiers. – 2016. – V. 7 (3). – P. 453–481.
5. Минералого-геохимические свидетельства полистадийности формирования месторождения Чертово Корыто / Ю.И. Тарасова, О.Т. Соцкая, С.Ю. Скузоватов, В.А. Ванин, З.И. Куликова, А.Е. Будяк // Геодинамика и тектонофизика. – 2016. – Т. 7. – № 4. – С. 663–677.
6. Шер С.Д. Металлогения золота. – М.: Недра, 1974. – 256 с.
7. Этапы формирования Бодайбинского золоторудного района / И.К. Рундквист, В.А. Бобров, Т.Н. Смирнова, М.Ю. Смирнов, М.Ю. Данилова, А.А. Ащеулов // Геология рудных месторождений. – 1992. – Т. 34. – № 6. – С. 3–15.
8. Geological and isotopic constraints on ore genesis, Huangjindong gold deposit, Jiangnan Orogen, southern China / Liang Zhang, Li-Qiang Yang, D.I. Groves, Yu Liu, Si-Chen Sun, Peng Qi, Sheng-Gang Wud, Jin-Song Peng // Ore Geology Reviews. – 2018. – V. 99 – P. 264–281.
9. Формы нахождения металлов платиновой группы и их генезис в золоторудном месторождении Сухой Лог (Россия) / В.В. Дистлер, Г.Л. Митрофанов, В.К. Немеров, В.А. Коваленкер, А.В. Мохов, Л.К. Семейкина, М.А. Юдовская // Геология рудных месторождений. – 1996. – Т. 38. – № 6. – С. 467–484.
10. Околорудный метасоматизм терригенных углеродистых пород в Ленском золоторудном районе / В.Л. Русинов, О.В. Русинова, С.Г. Кряжев, Ю.В. Щегольков, Э.И. Алышева, С.Е. Борисовский // Геология рудных месторождений. – 2008. – Т. 50. – № 1. – С. 3–46.
11. Кучеренко И.В. Пространственно-временные и петрохимические критерии связи образования золотого оруденения с глубинным магматизмом // Известия АН СССР. – 1990. – № 10. – С. 78–91.
12. Состав метасоматических минералов золоторудного месторождения Сухой Лог как критерий его генетической связи с базит-гипербазитовым магматизмом / В.Л. Русинов, О.В. Русинова, С.Е. Борисовский, Э.И. Алышева // Доклады РАН. – 2005. – Т. 405. – № 5. – С. 661–665.

13. Геодинамические условия формирования золоторудных месторождений Бодайбинского неопротерозойского прогиба / М.И. Кузьмин, В.В. Ярмолюк, А.М. Спиридонов, В.К. Немеров, А.И. Иванов, Г.Л. Митрофанов // Доклады РАН. – 2006. – Т. 407. – № 6. – С. 793–797.
14. Наталкинское золоторудное месторождение мирового класса: распределение РЗЭ, флюидные включения, стабильные изотопы кислорода и условия формирования руд (Северо-Восток России) / Н.А. Горячев, О.В. Викентьева, Н.С. Бортников, В.Ю. Прокофьев, В.А. Алпатов, В.В. Голуб // Геология рудных месторождений. – 2008. – Т. 50. – № 5. – С. 414–444.
15. Спиридонов А.М., Зорина Л.Д. Геолого-генетические модели золоторудных месторождений Забайкальской части Монголо-Охотского складчатого пояса // Геология и геофизика. – 2006. – Т. 47. – № 11. – С. 1158–1169.
16. Ying Ma, Shao-Yong Jiang, Hua-Liang Li. Isotope geochemistry and genesis of the Liyuan gold deposit, Shanxi, North China // Ore Geology Reviews. – 2018. – V. 92. – P. 129–143.
17. Кряжев С.Г. Изотопно-геохимические и генетические модели золоторудных месторождений в углеродисто-терригенных толщах // Отечественная геология. – 2017. – № 1. – С. 28–38.
18. In-situ sulfur isotope analysis of pyrite from the Pangjiahe gold deposit: Implications for variable sulfur sources in the north and south gold belt of the South Qinling orogeny / Jian Ma, Xinbiao Lüa, A. Escolme, Song Li, Ningli Zhao, Xiaofeng Cao, Lejun Zhang, Fei Lu // Ore Geology Reviews. – 2018. – V. 98. – P. 38–61.
19. Multistage pyrite in the Getang sediment-hosted disseminated gold deposit, southwestern Guizhou Province, China: insights from textures and in situ chemical and sulfur isotopic analyses / Xinlu Hu, Yongjun Gong, Guoping Zeng, Zhenjie Zhang, Jian Wang, Shuzhen Yao // Ore Geology Reviews. – 2018. – V. 99. – P. 1–16.
20. Ore genesis of the Bake gold deposit, southeastern Guizhou province, China: constraints from mineralogy, in-situ trace element and sulfur isotope analysis of pyrite / An-Lu Liu, Man-Rong Jiang, Th. Ulrich, Jun Zhang, Xiao-Jun Zhang // Ore Geology Reviews. – 2018. – V. 102. – P. 740–756.
21. Sulfur isotope and metal variations in sulfides in the BIF-hosted orogenic Cuiabá gold deposit, Brazil: implications for the hydrothermal fluid evolution / C. Kresse, L.M. Lobato, S.G. Hagemann, R.C. Figueiredo e Silva // Ore Geology Reviews. – 2018. – V. 98. – P. 1–27.
22. Fluid inclusions, H-O-S-Pb isotopes and metallogenic implications of Triassic Hua'naote Ag-Pb-Zn deposit (Inner Mongolia, China) in the eastern Central Asian Orogenic Belt / G.-Y. Qu, K.-Y. Wang, H. Yang, Q.-F. Sun, J. Li, W.-Y. Cai, C.-K. Lai // Journal of Geochemical Exploration. – 2021. – V. 225. – Article № 106766.
23. Fluid inclusion and stable (H-O-C) isotope studies of the giant Shuangjianzishan epithermal Ag-Pb-Zn deposit, Inner Mongolia, NE China / H. Zhang, D. Zhai, J. Liu, P. Li, K. Li, H. Sun // Ore Geology Reviews. – 2019. – V. 115. – Article № 103170.
24. In situ pyrite sulfur isotope and trace element analyses of the world-class Dachang gold deposit, northern Qinghai-Tibetan Plateau: implications for metallogenesis / W. Zhai, S.-Q. Zheng, L.-Y. Zhang, S.-Y. Han, W. Wang // Ore Geology Reviews. – 2021. – V. 138. – Article № 104347.
25. Gold speciation and transport in geological fluids: insights from experiments and physical-chemical modelling / G.S. Pokrovski, N.N. Akinfiev, A.Y. Borisova, A.V. Zotov, K. Kouzmanov // Geological Society. – London, Special Publications, 2014. – V. 402. – P. 9–70.
26. Золотоносный арсенопирит и условия его образования на золоторудных месторождениях Олимпиада и Ведуга (Енисейский кряж, Сибирь) / А.Д. Генкин, Ф.Е. Вагнер, Т.Л. Крылова, А.И. Цепин // Геология рудных месторождений. – 2002. – Т. 44. – № .1 – С. 59–76.
27. Новожилов Ю.И., Гаврилов А.М. Золото-сульфидные месторождения в углеродисто-терригенных толщах. – М.: ЦНИГРИ, 1999. – 175 с.
28. Involvement of anomalously As-Au-rich fluids in the mineralization of the Heilan'gou gold deposit, Jiaodong, China: evidence from trace element mapping and in-situ sulfur isotope composition / Kai Feng, Hong-Rui Fan, Fang-Fang Hua, Kui-Feng Yang, Xuan Liu, Yi-Ning Shangguane, Ya-Chun Cai, Peng Jiang // Journal of Asian Earth Sciences. – 2018. – V. 160. – P. 304–321.
29. Золотоносность арсенопирита золото-сульфидных месторождений Восточного Казахстана / К.Р. Ковалев, Ю.А. Калинин, Е.А. Наумов, М.К. Колесникова, В.Н. Королюк // Геология и геофизика. – 2011. – Т. 52. – № 2. – С. 225–242.
30. Geological characteristics, modes of occurrence of gold and genesis of San' guanmiao gold deposit, Shangnan, Shaanxi Province / C. Wang, R. Wang, Y. Liu, Y. Xue, X. Hu, L. Niu // Mineral Deposits. – 2021. – V. 40 (3). – P. 491–508.
31. Temperature-controlled ore evolution in orogenic gold systems related to synchronous granitic magmatism: an example from the iron Quadrangle Province, Brazil / W. Fabricio-Silva, H.E. Frimmel, M.E. Shutesky, C.A. Rosière, A.J. Massucatto // Economic Geology. – 2021. – V. 116 (4). – P. 937–962.
32. Вагина (Синкина) Е.А. Минеральные комплексы руд и генезис золоторудного месторождения Чертово Корыто (Патомское нагорье) // Известия Томского политехнического университета. – 2012. – Т. 321. – № 1. – С. 63–69.
33. Структурнодинамическая модель золоторудных месторождений, образованных в несланцевом и черносланцевом субстрате. Ч. 2. Месторождение Чертово Корыто (Патомское нагорье) / И.В. Кучеренко, Р.Ю. Гаврилов, В.Г. Мартыненко, А.В. Верхозин // Известия Томского политехнического университета. – 2009. – Т. 314. – № 1. – С. 23–38.
34. Иванов А.И., Лившиц В.И., Перевалов О.В. Докембрий Патомского нагорья. – М.: Недра, 1995. – 352 с.
35. Гаврилов Р.Ю. Аномальное геохимическое поле золоторудного месторождения Чертово Корыто (Ленский рудный район) // Известия Томского политехнического университета. Инжиниринг георесурсов. – 2019. – Т. 330. – № 7. – С. 7–16.
36. Reflectivity and microhardness of sulfide minerals as genetic information source (case study: Pyrite and arsenopyrite) / E.A. Sinkina, M.V. Korovkin, O.V. Savinova, A.A. Makarova // IOP Conference Series: Earth and Environmental Science. – 2016. – V. 33. DOI: 10.1088/1755–1315/33/1/012053.
37. Sinkina E.A., Savinova O.V., Nepryakhina O.B. Geology, mineralogy and fluid inclusion studies of the Chertovo Koryto deposit, North Transbaikal, Russia // Science and Technologies in Geology, Exploration and Mining: 16th International Multidisciplinary Scientific GeoConference, SGEM 2016. – Albena, Bulgaria, 30 June 2016 – 6 July 2016. – Code 124231.

*Поступила 29.12.2021 г.*

**Информация об авторах**

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

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

UDC 553.411:546.22

# ISOTOPIC CHARACTERIZATION OF ARSENOPYRITE SULFUR FROM THE CENTRAL PART OF THE CHERTOVO KORYTO DEPOSIT (PATOM UPLAND)

**Ekaterina A. Sinkina**[1],
vea@tpu.ru

**Roman Yu. Gavrilov**[1],
GavrilovRY@tpu.ru

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

***Relevance.*** *The Chertovo Koryto is located within the Lena gold-bearing province, in which large reserves of gold deposits are concentrated (Sukhoy Log, Verninskoe, Vysochayshee, Ozherele and other). A lot of time was devoted to the study of this province, which was reflected in a huge number of publications. Despite this, there is no single idea about the origin of the gold deposits formed in the black shale deposits of the Bodayba trough. The question of the source of the useful component and the determination of the mechanism of its transportation, redistribution and concentration remains debatable. In this regard, it becomes relevant to study the isotopic ratios of sulfur sulfides to determine a possible source of the noble metal. In the Chertovo Koryto deposit, the sulfur isotope ratios of sulfides have been studied in limited quantities. They do not reflect changes in* $\delta^{34}S$ *at depth and along the strike of the ore deposit. Therefore, this object is interesting for research in the field of isotope geology.*

***The aim*** *of the work is to identify possible sources of ore matter based on the results of isotopic studies of sulfur of the main mineral of ores – arsenopyrite.*

***The object*** *of the study is arsenopyrite from the central part of the ore deposit.*

***Methods:*** *mass spectrometric measurements using a gas mass spectrometer.*

***Results.*** *Studies have shown the constancy of the isotopic composition of arsenopyrite sulfur (–3,8...+4,3 %) in depth, which indicates a homogeneous source of sulfur during ore formation. Values close to the meteorite standard indicate an endogenous source of ore-forming fluids. The data obtained are consistent with the isotopic composition of sulfur of sulfides of different origin gold deposits formed in shale and other substrates.*

***Key words:***
*Isotopes, sulfur, sulfides, arsenopyrite, gold deposit, black shales.*

## REFERENCES

1. Buryak V.A. *Metamorfogenno-gidrotermalny tip promyshlennogo zolotogo orudeneniya* [Metamorphogenic-hydrothermal type of industrial gold mineralization]. Moscow, Nauka Publ., 1975. 45 p.
2. Buryak V.A. *Metamorfizm i rudoobrazovanie* [Metamorphism and ore formation]. Moscow, Nedra Publ., 1982. 256 p.
3. Buryak V.A., Khmelevskaya N.M. *Sukhoy Log – odno iz krupneyshikh zolotorudnykh mestorozhdeniy mira (genezis, zakonomernosti razmeshcheniya orudeneniya, kriterii prognozirovaniya)* [Sukhoi Log is one of the largest gold deposits in the world (genesis, patterns of mineralization placement, forecasting criteria)]. Vladivostok, Dalnauka Publ., 1997. 156 p.
4. Yudovskaya M.A., Distler V.V., Prokofiev V.Yu., Akinfiev N.N. Gold mineralisation and orogenic metamorphism in the Lena province of Siberia as assessed from Chertovo Koryto and Sukhoi Log deposits. *Geoscience Frontiers*, 2016, vol. 7 (3), pp. 453–481.
5. Tarasova Yu. I., Sotskaya O.T., Skuzovatov S.Yu., Vanin V.A., Kulikova Z.I., Budyak A.E. Mineralogical and geochemical evidence for multi-stage formation of the Chertovo Koryto deposits. *Geodynamics and Tectonophysics*, 2016, vol. 7, no. 4, pp. 663–677. In Rus.
6. Sher S.D. *Metallogeniya zolota* [Metallogeny of gold]. Moscow, Nedra Publ., 1974. 256 p.
7. Rundkvist I.K., Bobrov V.A., Smirnova T.N., Smirnov M.Yu., Danilova M.Yu., Ashcheulov A.A. Etapy formirovaniya Bodaybinskogo zolotorudnogo rayona [Stages of formation of the Bodayba gold mining district]. *Geologiya rudnykh mestorozhdeniy*, 1992, vol. 34, no. 6, pp. 3–15.
8. Liang Zhang, Li-Qiang Yang, Groves D.I., Yu Liu, Si-Chen Sun, Peng Qi, Sheng-Gang Wud, Jin-Song Peng. Geological and isotopic constraints on ore genesis, Huangjindong gold deposit, Jiangnan Orogen, southern China. *Ore Geology Reviews*, 2018, vol. 99, pp. 264–281.
9. Distler V.V., Mitrofanov G.L., Nemerov V.K., Kovalenker V.A., Mokhov A.V., Semeykina L.K., Yudovskaya M.A. Formy nakhozhdeniya metallov platinovoy gruppy i ikh genezis v zolotorudnoy mestorozhdenii Suhoy Log (Rossiya) [Forms of finding platinum group metals and their genesis in the Sukhoi Log gold deposit (Russia)]. *Geologiya rudnykh mestorozhdeniy*, 1996, vol. 38, no. 6, pp. 467–484.
10. Rusinov V.L., Rusinova O.V., Kryazhev S.G., Shchegolkov Yu.V., Alysheva E.I., Borisovskiy S.E. Okolorudny metasomatizm terrigennykh uglerodistykh porod v Lenskom zolotorudnom rayone [Near-ore metasomatism of terrigenous carbonaceous rocks in the Lena gold ore region]. *Geologiya rudnykh mestorozhdeniy*, 2008, vol. 50, no. 1, pp. 3–46.
11. Kucherenko I.V. Prostranstvenno-vremennye i petrokhimicheskie kriterii svyazi obrazovaniya zolotogo orudeneniya s glubinnym magmatizmom [Spatiotemporal and petrochemical criteria for relation of gold mineralization formation to deep magmatism]. *Izvestiya AN SSSR*, 1990, no. 10, pp. 78–91.
12. Rusinov V.L., Rusinova O.V., Borisovskiy S.E., Alysheva E.I. Sostav metasomaticheskikh mineralov zolotorudnogo mestorozhdeniya Sukhoy Log kak kriteriy ego geneticheskoy svyazi s bazit-giperbazitovym magmatizmom [The composition of metasomatic minerals of the Sukhoi Log gold deposit as a criterion of its genetic relationship with basite-hyperbasite magmatism]. *Doklady RAN*, 2005, vol. 405, no. 5, pp. 661–665.
13. Kuzmin M.I., Yarmolyuk V.V., Spiridonov A.M., Nemerov V.K., Ivanov A.I., Mitrofanov G.L. Geodinamicheskie usloviya formirovaniya zolotorudnykh mestorozhdeniy Bodaybinskogo neoproterozoyskogo progiba [Geodynamic conditions for the formation of gold deposits of the Bodayba Neoproterozoic trough]. *Doklady RAN*, 2006, vol. 407, no. 6, pp. 793–797.
14. Goryachev N.A., Vikenteva O.V., Bortnikov N.S., Prokofev V.Yu., Alpatov V.A., Golub V.V. Natalkinskoe zolotorudnoe mestorozhdenie mirovogo klassa: raspredelenie RZE, flyuidnye vklyucheniya, stabilnye izotopy kisloroda i usloviya formirovaniya rud (Severo-Vostok Rossii) [World-class Natalkinskoe gold deposit: REE distribution, fluid inclusions, stable oxygen isotopes and ore formation conditions (North-East of Russia)]. *Geologiya rudnyh mestorozhdenij*, 2008, vol. 50, no. 5, pp. 414–444.

15. Spiridonov A.M., Zorina L.D. Geologo-genetic models of gold deposits in the Transbaikalian area of the Mongolo-Okhotsk fold belt. *Russian Geology and Geophysics*, 2006, vol. 47, no. 11, pp. 1158–1169. In Rus.
16. Ying Ma, Shao-Yong Jiang, Hua-Liang Li. Isotope geochemistry and genesis of the Liyuan gold deposit, Shanxi, North China. *Ore Geology Reviews*, 2018, vol. 92, pp. 129–143.
17. Kryazhev S.G. Isotope-geochemical and genetic models of gold deposits in carbonaceousterrigenous strata. *Domestic geology*, 2017, vol. 92, pp. 28–38. In Rus.
18. Jian Ma, Xinbiao Lüa, Escolme A., Song Li, Ningli Zhao, Xiaofeng Cao, Lejun Zhang, Fei Lu. In-situ sulfur isotope analysis of pyrite from the Pangjiahe gold deposit: Implications for variable sulfur sources in the north and south gold belt of the South Qinling orogeny. *Ore Geology Reviews*, 2018, vol. 98, pp. 38–61.
19. Xinlu Hu, Yongjun Gong, Guoping Zeng, Zhenjie Zhang, Jian Wang, Shuzhen Yao. Multistage pyrite in the Getang sediment-hosted disseminated gold deposit, southwestern Guizhou Province, China: Insights from textures and in situ chemical and sulfur isotopic analyses, *Ore Geology Reviews*, 2018, vol. 99, pp. 1–16.
20. An-Lu Liu, Man-Rong Jiang, Ulrich Th., Jun Zhang, Xiao-Jun Zhang. Ore genesis of the Bake gold deposit, southeastern Guizhou province,China: Constraints from mineralogy, in-situ trace element and sulfur isotope analysis of pyrite. *Ore Geology Reviews*, 2018, vol. 102, pp. 740–756.
21. Kresse C., Lobato L.M., Hagemann S.G., Figueiredo e Silva R.C. Sulfur isotope and metal variations in sulfides in the BIF-hosted orogenic Cuiabá gold deposit, Brazil: implications for the hydrothermal fluid evolution. *Ore Geology Reviews*, 2018, vol. 98, pp. 1–27.
22. Qu G.-Y., Wang K.-Y., Yang H., Sun Q.-F., Li J., Cai W.-Y., Lai C.-K. Fluid inclusions, H-O-S-Pb isotopes and metallogenic implications of Triassic Hua'naote Ag-Pb-Zn deposit (Inner Mongolia, China) in the eastern Central Asian Orogenic Belt. *Journal of Geochemical Exploration*, 2021, vol. 225, article no. 106766.
23. Zhang H., Zhai D., Liu J., Li P., Li K., Sun H. Fluid inclusion and stable (H-O-C) isotope studies of the giant Shuangjianzishan epithermal Ag-Pb-Zn deposit, Inner Mongolia, NE China. *Ore Geology Reviews*, 2019, vol. 115, article no. 103170.
24. Zhai W., Zheng S.-Q., Zhang L.-Y., Han S.-Y., Wang W. In situ pyrite sulfur isotope and trace element analyses of the world-class Dachang gold deposit, northern Qinghai-Tibetan Plateau: implications for metallogenesis. *Ore Geology Reviews*, 2021, vol. 138, article no. 104347.
25. Pokrovski G.S., Akinfiev N.N., Borisova A.Y., Zotov A.V., Kouzmanov K. Gold speciation and transport in geological fluids: insights from experiments and physical-chemical modelling. *Geological Society*. London, Special Publications, 2014. Vol. 402, pp. 9–70.
26. Genkin A.D., Vagner F.E., Krylova T.L., Tsepin A.I. Zolotonosny arsenopirit i usloviya ego obrazovaniya na zolotorudnykh mestorozhdeniyakh Olimpiada i Veduga (Eniseyskiy kryazh, Sibir) [Gold-bearing arsenopyrite and conditions of its formation at the Olympiada and Veduga gold deposits (Yenisei Ridge, Siberia)]. *Geologiya rudnykh mestorozhdeniy*, 2002, vol. 44, no. 1, pp. 59–76.
27. Novozhilov Yu.I., Gavrilov A.M *Zoloto-sulfidnye mestorozhdeniya v uglerodisto-terrigennykh tolshchakh* [Gold-sulfide deposits in carbon-terrigenous strata]. Moscow, CNIGRI Publ., 1999. 175 p.
28. Kai Feng, Hong-Rui Fan, Fang-Fang Hua, Kui-Feng Yang, Xuan Liu, Yi-Ning Shangguane, Ya-Chun Cai, Peng Jiang. Involvement of anomalously As-Au-rich fluids in the mineralization of the Heilan'gou gold deposit, Jiaodong, China: evidence from trace element mapping and in-situ sulfur isotope composition. *Journal of Asian Earth Sciences*, 2018, vol. 160, pp. 304–321.
29. Kovalev K.R., Kalinin Yu.A., Naumov E.A., Kolesnikova M.K., Korolyuk V.N. Gold-bearing arsenopyrite in Kazakhstan gold-sulfide deposits. *Russian Geology and Geophysics*, 2011, vol. 52, no 2, pp. 225–242. In Rus.
30. Wang C., Wang R., Liu Y., Xue Y., Hu X., Niu L. Geological characteristics, modes of occurrence of gold and genesis of San' guanmiao gold deposit, Shangnan, Shaanxi Province. *Mineral Deposits*, 2021, vol. 40 (3), pp. 491–508.
31. Fabricio-Silva W., Frimmel H.E., Shutesky M.E., Rosière C.A., Massucatto A.J. Temperature-controlled ore evolution in orogenic gold systems related to synchronous granitic magmatism: an example from the iron Quadrangle Province, Brazil. *Economic Geology*, 2021, vol. 116 (4), pp. 937–962.
32. Vagina (Sinkina) E.A. Mineral complexes of ores and the genesis of the Chertovo Koryto gold deposit (Patom upland). *Bulletin of the Tomsk Polytechnic University*, 2012, vol. 321, no. 1, pp. 63–69. In Rus.
33. Kucherenko I.V., Gavrilov R.Yu., Martynenko V.G., Verkhozin A.V. Structural and dynamic model of gold ore deposits formed in non-shale and black shale substrate. P. 2. Chertovo Koryto deposit (Patom upland)]. *Bulletin of the Tomsk Polytechnic University*, 2009, vol. 314, no. 1, pp. 23–38. In Rus.
34. Ivanov A.I., Livshits V.I., Perevalov O.V. *Dokembriy Patomskogo nagorya* [Precambrian of the Patom Upland]. Moscow, Nedra Publ., 1995. 352 p.
35. Gavrilov R.Y. Anomalous geochemical field of the Chertovo Koryto gold deposit (Lensky ore district). *Bulletin of the Tomsk Polytechnic University. Geo Assets Engineering*, 2019, vol. 330, no. 7, pp. 7–16. In Rus.
36. Sinkina E.A., Korovkin M.V., Savinova O.V., Makarova A.A. Reflectivity and microhardness of sulfide minerals as genetic information source (case study: Pyrite and arsenopyrite). *IOP Conference Series: Earth and Environmental Science*, 2016, vol. 33. DOI: 10.1088/1755–1315/33/1/012053.
37. Sinkina E.A., Savinova O.V., Nepryakhina O.B. Geology, mineralogy and fluid inclusion studies of the Chertovo Koryto deposit, North Transbaikal, Russia. *Science and Technologies in Geology, Exploration and Mining. 16th International Multidisciplinary Scientific GeoConference, SGEM 2016*. Albena, Bulgaria, 30 June 2016 – 6 July 2016. Code 124231.

*Received: 29 December 2021.*

**Information about the authors**

***Ekaterina A. Sinkina***, Cand Sc., associate professor, National Research Tomsk Polytechnic University.

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

УДК 553.983

# ПРОГНОЗ ЛИТОЛОГИЧЕСКОГО СОСТАВА БАЖЕНОВСКОЙ СВИТЫ НА ОСНОВЕ КОМПЛЕКСНОЙ ИНТЕРПРЕТАЦИИ ГЕОЛОГИЧЕСКИХ И ГЕОФИЗИЧЕСКИХ МАТЕРИАЛОВ

**Фомин Михаил Александрович**[1,2],
FominMA@ipgg.sbras.ru

**Костырева Елена Анатольевна**[1],
KostyrevaEA@ipgg.sbras.ru

**Рыжкова Светлана Владимировна**[1,2],
RizhkovaSV@ipgg.sbras.ru

**Саитов Рашид Маратович**[1],
SaitovRM@ipgg.sbras.ru

**Сотнич Инга Сергеевна**[1],
SotnichIS@ipgg.sbras.ru

**Эдер Вика Георгиевна**[1],
EderVG@ipgg.sbras.ru

[1] Институт нефтегазовой геологии и геофизики им. А.А. Трофимука СО РАН,
Россия, 630090, г. Новосибирск, пр. Академика Коптюга, 3.

[2] Новосибирский государственный университет,
Россия, 630090, г. Новосибирск, ул. Пирогова, 1.

*В связи с истощением запасов нефти в традиционных гранулярных коллекторах в Западно-Сибирской нефтегазоносной провинции все большую значимость приобретает разработка и совершенствование технологических приемов, увеличивающих объемы добычи нефти из низкопроницаемых пород баженовской свиты. Перспективы нефтеносности этих отложений в значительной степени зависят от их литологии. В этой связи разработка методического подхода расчета минерально-компонентного состава баженовской свиты в скважинах, не охарактеризованных керновым материалом, представляется актуальным исследованием.*

***Объектом*** *исследования являются карбонатно-глинисто-кремнистые породы баженовской свиты, характеризующиеся большой неоднородностью минерально-компонентного состава по разрезу.*

***Цель:*** *выявление и изучение взаимосвязей между литологическим составом пород и электрическими и радиоактивными свойствами баженовской свиты в центральной части Западно-Сибирского осадочного бассейна для разработки методики расчета содержания основных породообразующих компонентов в разрезе этой свиты.*

***Методы:*** *выявление взаимосвязей между минерально-компонентным составом пород баженовской свиты и ее электрическими и радиоактивными свойствами; статистический анализ полученных связей; расчет на их основе литологического состава баженовских пород в базовой, а также в соседних скважинах.*

***Результаты.*** *В статье изложены результаты комплексной литолого-геофизической интерпретации данных широкого комплекса электрического и радиоактивного каротажа и результатов аналитических исследований керна, на основе которых разработан и апробирован методический подход к расчету концентраций основных породообразующих компонентов баженовской свиты. Он основывается на выявленных взаимосвязях между минерально-компонентным составом пород и их физическими свойствами. Показана удовлетворительная сходимость расчетных значений и данных по керну, построена объемная литологическая модель для одной из скважин Дружной площади. Обосновано использование полученных взаимосвязей для достоверного расчета литологического состава баженовской свиты в близко расположенных скважинах, не охарактеризованных керновым материалом. Показана невозможность использования предлагаемого методического подхода на расстоянии в несколько десятков км, а также в тонкослоистых разрезах.*

***Ключевые слова:***
*Баженовская свита, Западная Сибирь, керн, ГИС, литологический состав, методический подход.*

## Введение

В Российской Федерации на фоне падения добычи нефти из традиционных коллекторов увеличивается доля трудноизвлекаемых запасов (ТРИЗ). В ближайшие два–три десятилетия развитие российской нефтяной промышленности будет в значительной степени связано с разработкой и внедрением технологий добычи нефти из сложных геологических объектов. В зрелой Западно-Сибирской нефтегазоносной провинции основные перспективы прироста запасов нефти на средне- и долгосрочную перспективу связаны с уникальным геологическим объектом – баженовской свитой (БС).

С точки зрения литологии, условий накопления органического вещества (ОВ) в осадке и его последующего преобразования, структуры пустотного про-


DOI 10.18799/24131830/2022/1/3326

странства этих пород полных аналогов баженовской свиты в мире нет [1]. Наиболее сходной по литологическому составу является американская формация *Green River*, которая содержит крупнейшее месторождение горючих сланцев в мире. Она входит в состав геологического образования Green River раннесреднеэоценового возраста, которое представляет собой комплекс отложений озерных, озерно-речных, дельтовых осадков и занимает юго-запад штата Вайоминг, северо-запад Колорадо, северо-восток Юты. Под керогенсодержащей формацией подразумеваются породы центральной озерной «сланцевой» части образования Green River. Эти отложения представляют собой переслаивание карбонатов и глинистых карбонатов с высокоуглеродистыми породами ($C_{орг}$ изменяется от 0,5 до 8,1 %, в среднем 3,1 %) от бежевых до черных, тонкослоистых, содержащих кероген I типа [2]. Нужно отметить относительно небольшие глубины залегания формации и, как следствие, низкую зрелость и степень преобразованности органического вещества: процесс вызревания ОВ и дальнейшей генерации жидких УВ затронул не более чем 10 % от общего объема ОВ в формации.

Формация Green River считается перспективной с точки зрения нефтеносности. Специалисты по всему миру занимаются изучением пустотного пространства этих отложений методами компьютерной томографии [3], измерением их пористости и проницаемости до и после пиролитических исследований [4], анализом физических свойств керогена, определением скоростей выхода и химического состава углеводородов в зависимости от температуры и скорости нагревания образцов в процессе пиролиза [5–8]; моделированием пространственного распределения керогена в породе [9]; разработкой кинетических моделей реакции на основе пиролитических исследований [10]; изучением характеристик высокомолекулярных соединений в керогене с использованием метода спектроскопии ядерного магнитного резонанса [11].

Формация *Bakken* (поздний девон – ранний карбон) является самым известным источником сланцевой нефти. Она занимает около 520 тыс. км$^2$ территории США (штаты Монтана, Северная Дакота) и Канады (провинции Саскачеван и Манитоба), залегает на глубинах от 2,5 до 3,5 км, а мощность не превышает 40 м [2]. Bakken состоит из трех основных литостратиграфических единиц: нижней и верхней низкопроницаемых сланцевых частей с высоким содержанием органического вещества I–II типа (в среднем 11,3 %) и средней относительно проницаемой части, состоящей из переслаивания песчаников, доломитизированных песчаников, доломитов и алевролитов, а также редких глинистых прослоев общей мощностью 10–20 м. Резервуаром формации Bakken является её средняя часть. Высокое содержание в ней кремнезема и доломита [12] увеличивает хрупкость породы, что способствует образованию трещин, обеспечивающих фильтрацию флюида при разработке этих пород.

Формация *Eagle Ford* позднемелового возраста простирается вдоль западного побережья Мексиканского залива от Восточного Техаса до Мексики. Богатая органическим веществом нижняя часть формации образовалась в основном в теплый и влажный период, что, вероятно, связано с субгумидной региональной климатической фазой во время сеноман-туронского глобального потепления и в условиях аноксии [13]. Формации Eagle Ford погружается в сторону Мексиканского залива в южном направлении, достигая глубин более 4,3 км. По мере увеличения глубины залегания изменяется тип и фазовое состояние пластового флюида: газ, сжиженный природный газ, нефть [1]. Площадь нефтяной части составляет 9200 км$^2$, а толщина изменяется от 30 до 85 м (в среднем 76 м). Eagle Ford представляет собой сланец, в составе которого около 50–70 % кальцита и доломита [14], остальное – кремнезем [15] и ОВ II типа [16]. Высокое содержание карбонатных минералов делает пласт хрупким и более подверженным трещинообразованию.

Геологическое образование *Niobrara* сланцевой нефти позднемелового возраста расположено в северо-восточной части штата Колорадо и захватывает части соседних Вайоминга, Небраски и Канзаса. Глубины залегания формации Niobrara увеличиваются от 1 км в восточной части до 3,5 км на западе, а толщина не превышает 100 м [1]. По аналогии с формацией Eagle Ford, по мере погружения изменяется зрелость органического вещества от верхней зоны газообразования до главной зоны нефтеобразования [17]. Изучая формацию Niobrara, исследователи установили переслаивание слоев почти чистого белого мела со слоями обломочных, богатых органикой, известковых глинистых сланцев. Общее содержание $C_{орг}$, как правило, не превышает 6 %. Высокое содержание в породе мела обуславливает образование большого количества трещин [18], которые обеспечивают относительно высокие фильтрационно-емкостные свойства.

Таким образом, главным отличием баженовской свиты от американских нефтяных сланцевых аналогов является литологический состав. Она содержит большее количество глинистого и кремнистого вещества, ОВ как основного породообразующего компонента [19, 20] и меньшее количество карбонатного материала, представленного кальцитом и доломитом. Повышенное содержание глин и органического вещества уменьшает хрупкость баженовской свиты, что негативно влияет на образование и «продолжительность жизни» природных и искусственных трещин, которые обеспечивают повышенные фильтрационно-емкостные свойства.

В настоящее время ведущие недропользователи страны проводят опытно-промышленную эксплуатацию баженовских отложений на своих лицензионных участках. Объем свободной нефти в этих низкопроницаемых породах в значительной степени определяется их литологией. В этой связи разработка методического подхода расчета минерально-компонентного состава баженовской свиты в скважинах, не охарактеризованных керновым материалом, представляется актуальным исследованием. В качестве объектов исследования выбраны разрезы баженовской свиты в северной части ХМАО (рис. 1).

Важной особенностью баженовской свиты является неоднородность ее минерально-компонентного состава по разрезу и по площади. В изучаемом регионе разрезы, находящиеся друг от друга на расстоянии нескольких десятков километров, могут быть существенно различными [21–25], что обусловлено особенностями седиментации и постседиментационными преобразованями пород баженовских отложений. Для детального понимания геологии этой свиты и обоснования ее промышленной значимости в каждом конкретном районе необходимо изучать керн по густой сетке скважин (каждые 5–10 км), что попросту невозможно ввиду большой дороговизны и длительности аналитических исследований.

***Рис. 1.*** *Обзорная карта территории исследования: 1) скважины с результатами аналитических исследований кернового материала; 2) скважина, где была рассчитана литология по ГИС; 3) административная граница; 4) речная сеть*

***Fig. 1.*** *Overview map of the study area: 1) wells with the results of analytical studies of core material; 2) well, where the lithology was calculated according to logging; 3) administrative boundary; 4) river network*

Методы прогноза литологического состава нефтеперспективных, в том числе и черносланцевых, толщ активно применяются во всем мире [26, 27]. Предложена методика расчета литотипов (по данным ГИС) в разрезе баженовской свиты на Салымском месторождении [28]. На наш взгляд, такой подход вносит некоторый субъективизм в оценку литологии этой толщи, поскольку разными коллективами [19, 29–31] породы баженовской свиты классифицируются по-разному. Известны литологические модели, основанные на литолого-электрофизической интерпретации данных электромагнитных зондирований для определения вещественного состава баженовской свиты [32, 33], которые, однако, не учитывают альбит как один из основных минеральных компонентов.

Наиболее объективным нам кажется расчет на основе данных ГИС содержания основных породообразующих компонентов баженовской свиты. Наряду с кремнистым, глинистым, карбонатным материалом, альбитом и ОВ значимым минеральным компонентом является и образовавшийся в диагенезе пирит, содержание которого в баженовской свите, как правило, более 5 %, а в некоторых образцах в верхней части ее разреза на рассматриваемой территории превышает 10 % [34].

В настоящей статье изложена методика расчета литологического состава баженовской свиты на основе данных электрического и радиоактивного каротажа. Представленный авторами подход основан на выявлении и обосновании физических связей между ми-

нерально-компонентным составом пород и значениями указанных видов каротажа. Он позволяет прогнозировать литологический состав в разрезах, не охарактеризованных керновым материалом, расположенных в пределах одной или соседних площадей с разрезами, по которым проведены детальные литологические исследования. Для северных районов ХМАО такое исследование выполнено впервые.

Согласно последним дополнениям к [35] одним из признаков коллекторов I и II типов в баженовской свите является пониженное содержание глин, ОВ, пирита и повышенное содержание карбонатной и кремнистой составляющей, присутствие фосфатных разностей. Методика количественного прогноза литологического состава баженовской свиты, предложенная в этой статье, позволит выделять возможные интервалы-коллекторы в скважинах, не охарактеризованных керновым материалом.

#### Фактический материал и методика исследования

Для исследования использовались результаты определения литологического состава пород баженовской свиты (содержание глинистых и карбонатных минералов, кремнезема, альбита, пирита, апатита), полученные путем пересчета химического состава пород на минералогический по методике [36]. Для пересчета использовались результаты: 1) РФА о содержании породообразующих оксидов (ИГМ СО РАН); 2) химических методов анализа определения форм железа и серы (ИГМ СО РАН); 3) определения содержания органического углерода ($C_{орг}$) с помощью весового полумикрометода (ИНГГ СО РАН), полученные на экспресс-анализаторе (АН-7529) при температуре 1000–l100 °С в токе кислорода из нерастворимого остатка (НО) породы после ее обработки 10 % соляной кислотой.

В скважине Дружная I, которая является базовой скважиной в настоящем исследовании, авторами выявлены физические связи между минерально-компонентным составом (карбонатный, глинистый и кремнистый материал, альбит, пирит, ОВ) баженовской свиты и данными электрического (БК – боковой каротаж, КС (зонд Gz3) – кажущееся удельное сопротивление; микрокаротаж: МГЗ – микроградиент зонд, МПЗ – микропотенциал зонд, МБК – микробоковой каротаж) и радиоактивного (ГК – гамма-каротаж, НГК – нейтронный гамма-каротаж, НКТБ и НКТМ – нейтронный каротаж по тепловым нейтронам (большой и малый зонды), ГГК-П – гамма-гамма плотностной каротаж) каротажа. Для более точного выделения границ баженовской свиты кроме вышеперечисленных видов ГИС использовался также индукционный каротаж и каверномер. Для корректного выполнения исследования все значения ГИС были нормированы, т. е. пересчитаны в диапазоне от 0 до 1 по методике, приведенной в работе [29]. После этого в программном пакете GeoOffice Solver с помощью статистических графиков были проанализированы трехмерные зависимости содержания каждого породообразующего компонента от нескольких видов каротажа, которые послужили основой расчета их содержания в породе. Расчетные кривые были сопоставлены с данными по керну. На основе связей керн–ГИС, установленных в базовой скважине, был рассчитан литологический состав баженовской свиты в скважине Дружная II, расположенной в 5 км от нее, а также в одной из скважин Повховской площади.

#### Литологический состав баженовской свиты и его отражение в физических полях

Ниже приводится краткое литологическое описание основных пачек баженовской свиты в одной из скважин Дружной площади (снизу вверх по разрезу) в соответствии с классификацией пород баженовской свиты, представленной в работе [19]. Выделяемые в разрезе баженовской свиты шесть пачек отличаются по соотношению содержаний углеродистой, глинистой, кремнистой и карбонатной компонент пород, что определяется обстановками их седиментации [20, 21]. Границы пачек были сначала определены по их литологическому составу, а затем были скорректированы по ГИС.

*Пачка 1* (3,7 м) – представлена преимущественно силицитами, в кровле залегают силициты-радиоляриты, в некоторых разрезах карбонатизированные [24], вблизи подошвы в силицитах присутствуют зерна глауконита и единичные фосфатные линзы. На кривых ГИС пачка представлена более высокими относительно подстилающей георгиевской свиты значениями бокового каротажа. Отмечаются локальные увеличения естественной радиоактивности пород, связанные с повышенными концентрациями ОВ в породах. В целом значения ГК плавно возрастают снизу вверх по разрезу. Для этой пачки по сравнению с перекрывающими характерно увеличение значений НКТБ и НКТМ, а также плотностного каротажа – в прикровельной части наблюдается пик значений по ГГК-П, что может быть связано с мощным прослоем радиолярита. К сожалению, в этом интервале разреза образцы не были отобраны, однако южнее и западнее такой прослой по литологическим данным в разрезе баженовской свиты выделяется [20].

*Пачка 2* (3,1 м) – силициты керогеновые (скрытокристаллические) с прослоями силицитов-радиоляритов; в нижней половине пачки распространены известковые прослои. В связи с увеличением концентраций ОВ до 8–10 % в этой пачке отмечаются повышенные по сравнению с пачкой 1 значения гамма-каротажа и бокового каротажа. Многочисленные прослои радиоляритов отмечаются локальными максимумами на диаграммах ГГК-П и локальными минимумами на кривой ГК.

*Пачка 3* (6,2 м) – силициты керогеновые (скрытокристаллические) с прослоями силицитов-радиоляритов, в некоторых разрезах карбонатизированных. На кривых ГИС для этой пачки характерны еще более высокие значения по ГК и БК, чем для пачки 2, что связано с увеличением содержания ОВ до 12–14 %. Редкие прослои с повышенным содержанием карбонатного материала отмечаются локальными пиками на кривых НКТМ и НКТБ. В прикровельной части выделяется плотный интервал, выражен-

ный повышенными значениями на кривых плотностного и нейтронного каротажа.

*Пачка 4* (2,7 м) – микститы кероген-кремнистые с прослоями силицита керогенового скрытокристаллического или силицита-радиолярита; в верхней части пачки присутствуют частые тонкие известковые прослои. На каротажных диаграммах эта высокоуглеродистая пачка отмечается ярко выраженным пиком естественной радиоактивности, пониженными по отношению в выше- и нижележащим отложениям значениями нейтронного и плотностного каротажа, высокими значениями БК.

*Пачка 5* (4,5 м) – нижняя часть пачки слагается микститами кероген-кремнистыми вверх по разрезу, переходящими в тонкое переслаивание микститов кероген-глинисто-кремнистых и кероген-карбонатно-кремнистых с остатками кокколитофоридовых водорослей, для пачки характерно присутствие частых известковых конкреций (0,5–3 см). Породы этой пачки на каротажных диаграммах характеризуются максимальными значениями электрического сопротивления. В низах пачки выделяется ярко выраженные пики по ГК и БК, которые коррелируют с прослоями с наиболее высокими в этом разрезе содержаниями ОВ – 23 %. В пачке установлены повышенные концентрации пирита, достигающие 15 %. В верхней части пачки преобладает карбонатный материал, который отражается в физических полях повышенными значениями ГГК-П, НКТБ и НКТМ.

*Пачка 6* (1,4 м) – микститы кремнисто-глинистые, пиритизированные, в некоторых разрезах с прослоями известняка или доломита. На диаграммах ГИС в средней части этой пачки отмечаются наибольшие во всем разрезе свиты значения ГК, обусловленные высокими содержаниями ОВ. Повышенное содержание пирита, определенное в одном из образцов, также связано с высокими значениями ОВ [34] и отмечается локальными пиками значений электрического сопротивления. В верхней части пачки наблюдается повышение значений ГГК-П, НКТБ и НКТМ, обусловленное постепенным сокращением в разрезе содержания ОВ и увеличением глинистой компоненты.

Перечисленные выше виды ГИС являются наиболее значимыми при характеристике литологического состава баженовской свиты. Эти методы использовались в дальнейшем для установления связей керн–ГИС и расчетов минерально-компонентного состава этих отложений.

### Результаты и их обсуждение

Как известно, баженовская свита характеризуется пониженной относительно выше- и нижележащих отложений плотностью в связи с высоким содержанием в ней ОВ (керогена, согласно [19]) и пониженным содержанием глинистых минералов. Радиоактивность черносланцевых пород находится в тесной связи с содержанием в них ОВ [37, 38], которое является сорбентом урана из морской воды. Содержание ОВ в баженовской свите и перекрывающих отложениях, как было показано ранее [39–41], имеет устойчивую связь с радиоактивным каротажем: ГК (рис. 2, *а*), ГГК-П (рис. 2, *б*), НКТБ, а концентрации глинистых минералов в этом же интервале разреза лучше всего коррелируют с БК (рис. 3, *а*) и ГГК-П (рис. 3, *б*).

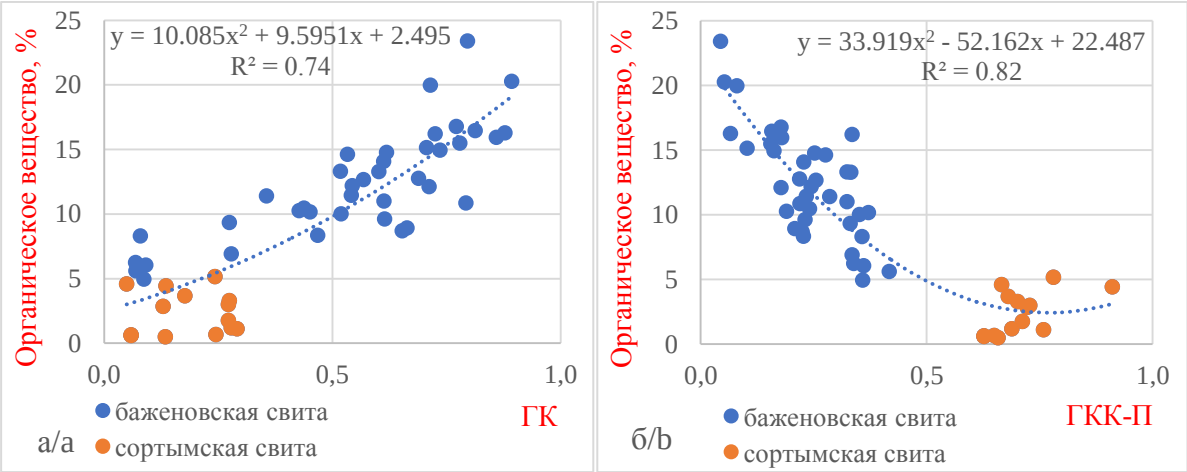



***Рис. 2.*** *Взаимосвязь содержания органического вещества и значений гамма-каротажа (а) и гамма-гамма плотностного (б) каротажа для баженовской свиты и нижней части сортымской свиты*

***Fig. 2.*** *Relationship between organic matter content and values of gamma-ray logging (a) and gamma-gamma density (b) logging for the Bazhenov Formation and the lower part of the Megion Formation*

Более темные (коричневые) точки на графиках относятся к переходной области от баженовской к сортымской свите – в этих образцах уже возрастает глинистость (до 55–60 % против 20–25 % в баженовской свите), но еще достаточно высокое содержание ОВ (3–5 % против 0,5–1 % в вышележащих слоях сортымской свиты). В рамках исследования баженовская свита и нижняя (переходная) часть сортымской свиты рассматриваются для установления связей керн–ГИС как единая непрерывная толща пород сходного генезиса.

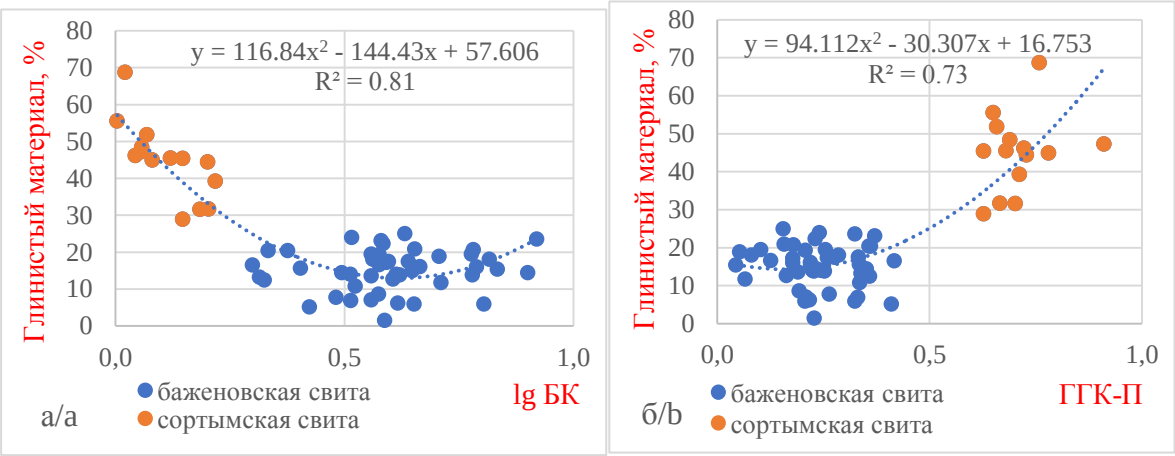



***Рис. 3.*** *Взаимосвязь содержания глинистых минералов и значений бокового (а) каротажа и значений гамма-гамма плотностного каротажа (б) для баженовской свиты и нижней части сортымской свиты*

***Fig. 3.*** *Relationship between the content of clay minerals and the values of lateral (a) logging and values of gamma-gamma density logs (b) for the Bazhenov Formation and the lower part of the Megion Formation*

В верхней приграничной части разреза баженовской свиты концентрация ОВ уменьшается, возрастает содержание пирита, что связано с миграцией сульфидсодержащих флюидов и сероводородсодержащих растворов из баженовской свиты в диа- и катагенезе [21, 34]. Концентрации пирита находятся в тесной корреляции с удельным электрическим сопротивлением – значениями бокового и микробокового каротажа. Такие устойчивые связи объясняются тем, что содержание пирита в большинстве случаев тесно связано с концентрациями ОВ (в том числе и жидких углеводородов) в баженовской свите, которые характеризуются высоким электрическим сопротивлением. Содержания кремнистого материала и альбита (рис. 4) имеют хорошо выраженные связи с удельным электрическим сопротивлением пород (БК, МБК), а также с ГГК-П. Концентрации карбонатного материала коррелируют со значениями всех рассмотренных видов нейтронного каротажа и удельным электрическим сопротивлением.

Полученные расчетные кривые хорошо увязываются с данными по керну, что подтверждается высокими значениями величины достоверной аппроксимации ($R^2$), которая для разных компонентов изменяется от 0,7 до 0,9. Представленная на планшете (рис. 5) объемная модель наглядно показывает относительное содержание основных породообразующих компонентов в баженовской свите и их распределение по разрезу.

На основе установленных взаимосвязей керн–ГИС было рассчитано содержание основных компонентов в скважине Дружная II (рис. 6), которая находится на расстоянии около 5 км от скважины Дружная I. Близкое расположение скважин и сходные диапазоны значений всех видов ГИС позволяют предполагать схожий литологический состав баженовской свиты, поэтому полученные расчетные данные можно считать достоверными. В этой скважине хорошо прослеживаются границы всех шести пачек, выделенных в базовой скважине. Важно отметить, что сумма полученных расчетных значений содержания породных компонентов в скважине Дружная II составила около 100 % в каждой рассчетной точке разреза.

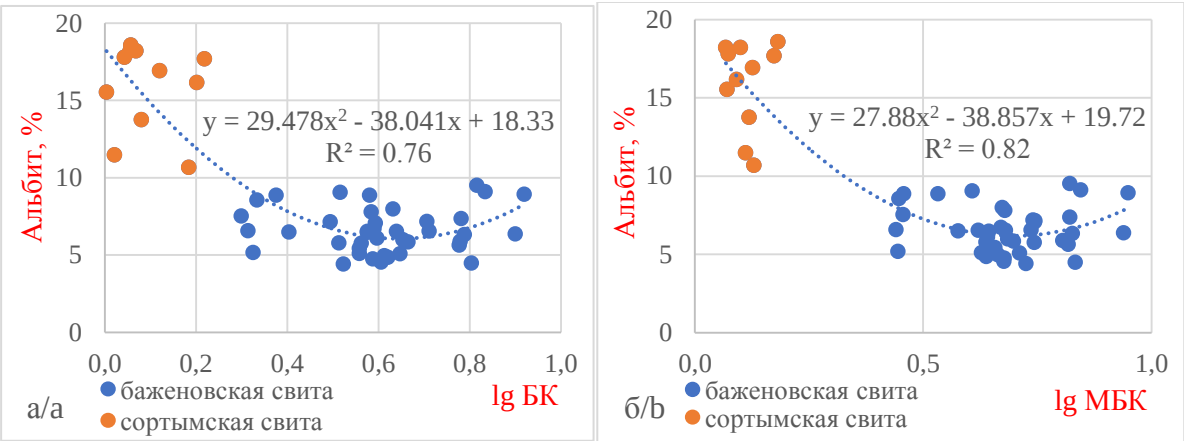



***Рис. 4.*** *Взаимосвязь содержания альбита и значений бокового (а) и микробокового (б) каротажа для баженовской свиты и нижней части сортымской свиты*

***Fig. 4.*** *Relationship between albite content and lateral (a) and micro-lateral (b) logging values for the Bazhenov Formation and the lower part of the Megion Formation*

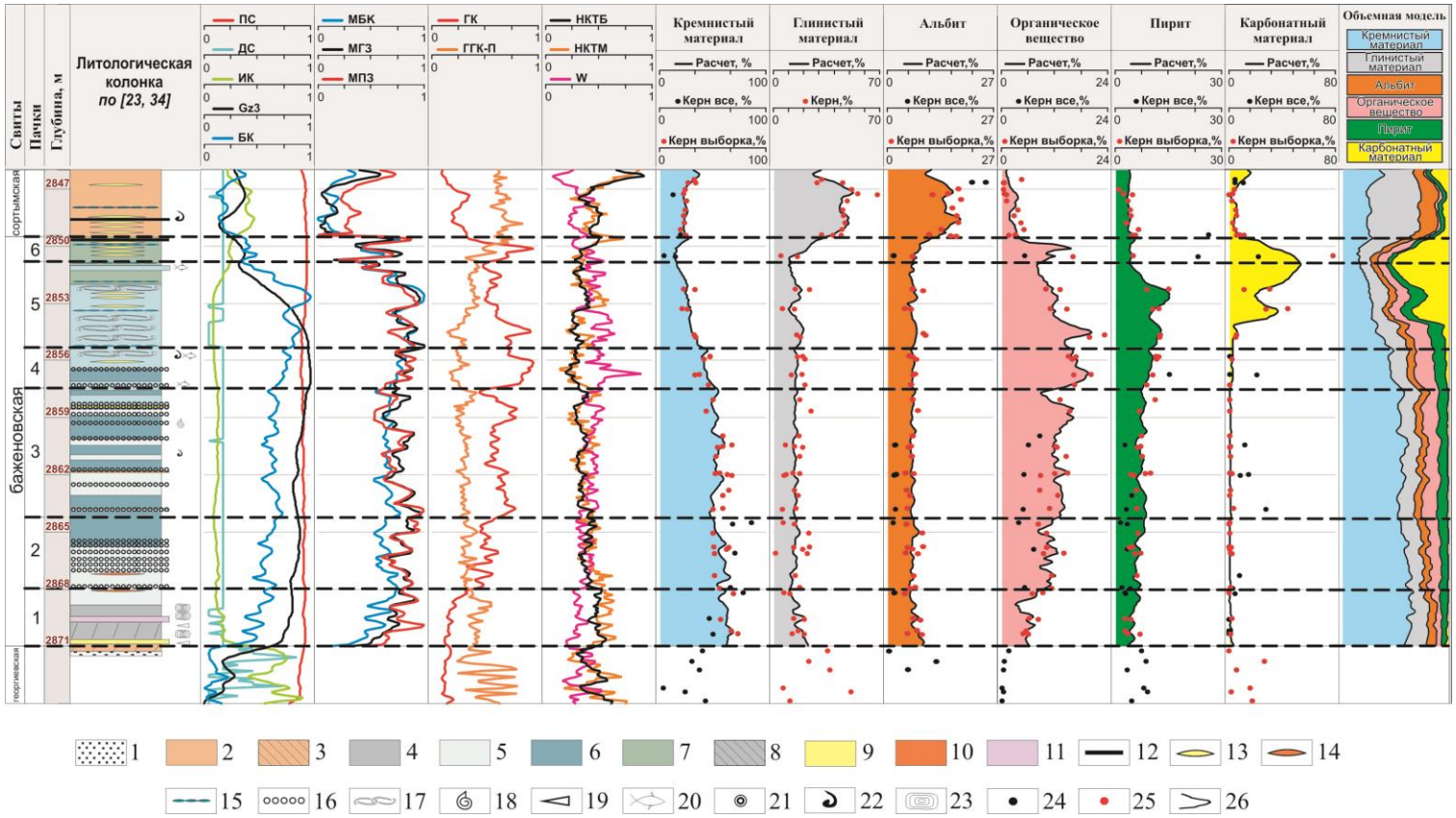



***Рис. 5.*** *Геолого-геофизический планшет по скважине Дружная I. Типы пород: 1 – песчаник, 2 – аргиллит, 3 – микстит кремнистый, 4 – микстит глинисто-кремнистый, 5 – силицит, 6 – силицит керогеновый, 7 – микстит кероген-кремнистый, кероген-кремнисто-карбонатный, 8 – микстит глинистый, 9 – известняк, 10 – порода с содержанием апатита >5 %, 11 – порода с содержанием родохрозита >25 %; Аутигенные минералы: 12 – прослои пирита, 13 – известковая линза, 14 – линзы с содержанием апатита >5 %, 15 – линзы микрокристаллического кремнезема; Органические остатки: 16 – прослои радиолярита, 17 – прослои с двустворками, 18 – аммониты, 19 – белемниты, 20 – остатки рыб, 21 – кокколитофориды, 22 – крючки онихитес, 23 – онколиты, 24 – все определения минерального состава пород по керну, 25 – определения минерального состава пород по керну, используемые для установления связей керн–ГИС, 26 – расчетные кривые минерального состава пород*

***Fig. 5.*** *Geological and geophysical chart of one of the Druzhnaya I well. Rock types: 1 – sandstone, 2 – mudstone, 3 – siliceous mixtite, 4 – argillaceous-siliceous mixtite, 5 – silicite, 6 – kerogen silicite, 7 – kerogen-siliceous mixtite, kerogen-siliceous-carbonate, 8 – argillaceous mixtite, 9 – limestone, 10 – rock with apatite content >5 %, 11 – rock with rhodochrosite content >25 %; Authigenic minerals: 12 – pyrite interlayers, 13 – lime lens, 14 – lenses with apatite content >5 %, 15 – microcrystalline silica lenses; Organic remains: 16 – radiolarite interlayers, 17 – interlayers with bivalves, 18 – ammonites, 19 – belemnites, 20 – fish remains, 21 – coccolithophorids, 22 – onychites hooks, 23 – oncoliths, 24 – all determinations of the mineral composition of rocks by core, 25 – determination of the mineral composition of rocks from the core, used to establish the core–GIS relation, 26 – calculated curves of the mineral composition of rocks*

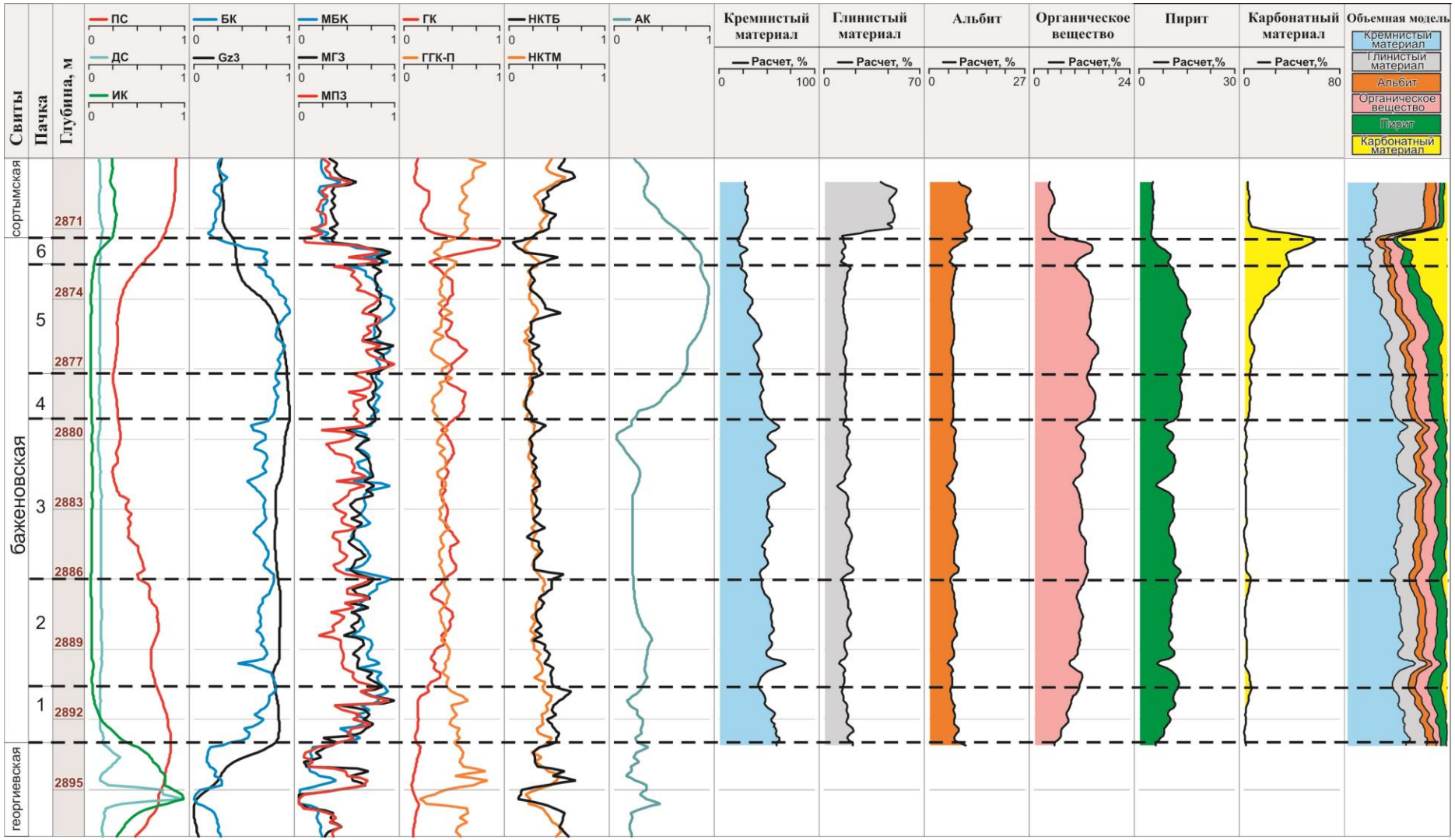



***Рис. 6.*** *Геолого-геофизический планшет по скважине Дружная II (условные обозначения – на рис. 5)*

***Fig. 6.*** *Geological and geophysical chart of one of the Druzhnaya II well (see Fig. 5 for legend)*

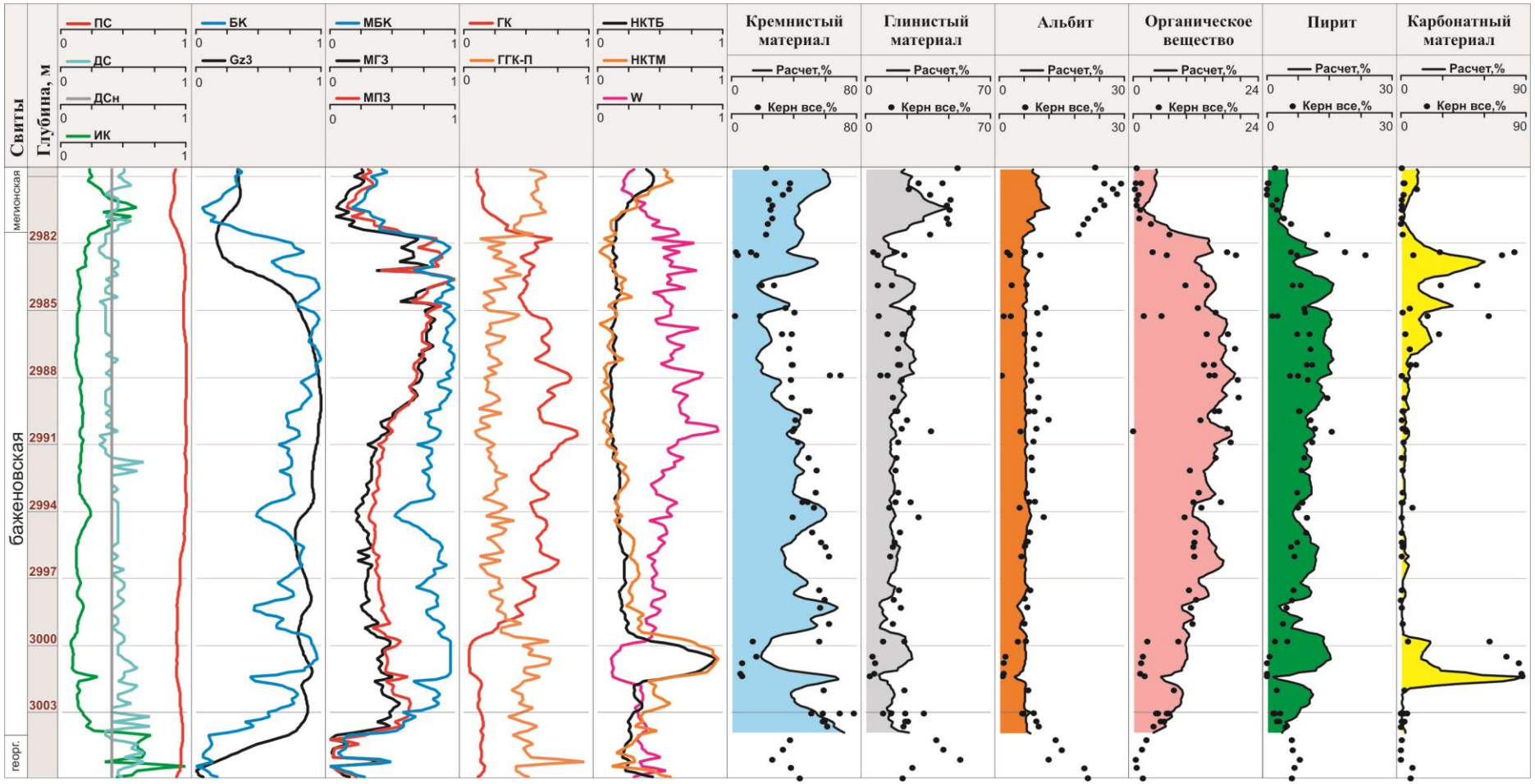



***Рис. 7.*** *Геолого-геофизический планшет по скважине Повховская (условные обозначения – на рис. 5)*
***Fig. 7.*** *Geological and geophysical chart of one of the Povhovskaya well (see Fig. 5 for legend)*

Используя зависимости керн–ГИС, полученные в скважине Дружная I, был рассчитан литологический состав баженовской свиты в скважине Повховская (рис. 7), расположенной в 40 км от базовой скважины. В отличие от Дружной площади, разрез баженовской свиты в Повховской площади менее однороден, особенно в его верхней части. Было установлено, что расчетные кривые содержания кремнистого материала и пирита неудовлетворительно сопоставляются с данными по керну. Расчетные содержания органического вещества, глинистого материала и пирита значительно хуже, чем в Дружной I, коррелируют с фактическими данными. Из этого сделан вывод о невозможности корректного использования выявленных связей керн–ГИС на таких расстояниях от базовой скважины.

Также предлагаемая методика расчета не применима в сильно слоистых разрезах, когда образцы, отобранные на расстоянии 5–7 см друг от друга, имеют значимо разный минеральный состав и, следовательно, контрастные свойства. Например, верхняя часть разреза на Новоортъягунской площади представлена переслаиванием микститов кероген-глинисто-кремнистых и кероген-кремнисто-карбонатных с реликтами кокколит. Толщина этих прослоев составляет 3–5 см [24], что намного меньше разрешающей способности приборов ГИС, не превышающей 30–40 см. В таких тонкослоистых разрезах породы с существенно разной литологией будут иметь одинаковые значения физических параметров, что не позволяет установить связи керн–ГИС.

### Выводы

На основе комплексного анализа данных различных видов электрического и радиоактивного каротажа и результатов аналитических исследований керна выработан методический подход для расчета концентраций основных породообразующих компонентов баженовской свиты, построена объемная модель их содержания в разрезе одной из скважин Дружной площади. Показано, что полученные зависимости можно использовать для достоверного расчета литологического состава баженовской свиты в близко расположенных скважинах.

Применение предложенного методического подхода будет способствовать:

1) более корректному сопоставлению разрезов без керна, включая прослеживание пачек, отвечающих определенным этапам осадконакопления баженовской свиты;
2) уточнению закономерностей распространения основных компонентов пород (кремнезем, глинистый материал, карбонаты, альбит, пирит, ОВ) по отдельной площади, а при наращивании базы данных – в целом для верхнеюрско-нижнемелового Западно-Сибирского палеобассейна, что, в свою очередь, будет крайне важным для детальных палеогеографических реконструкций.

Результаты подобной литолого-геофизической интерпретации послужат основой для выделения интервалов-коллекторов в разрезе баженовской свиты, в том числе в скважинах, не охарактеризованных керновым материалом.

*Установление и обоснование физических связей между минерально-компонентным составом баженовской свиты и значениями электрического и радиоактивного каротажа выполнено при финансовой поддержке РФФИ в рамках научного проекта № 20-35-90049 Аспиранты. Апробация методического подхода для расчета концентраций основных породообразующих компонентов баженовской свиты на основе выявленных связей керн–ГИС реализована при финансовой поддержке проекта НИР FWZZ-2022-0012 программы ФНИ*

### СПИСОК ЛИТЕРАТУРЫ

1. Soeder D.J., Borglum S.J. The fossil fuel revolution: shale gas and tight oil. – Eastbourne: Elsevier, 2019. – 336 p.
2. Нефть и газ низкопроницаемых сланцевых толщ – резерв сырьевой базы углеводородов России / О.М. Прищепа, О.Ю. Аверьянова, А.А. Ильинский, Д. Морариу. – СПб: Изд-во ФГУП «ВНИГРИ», 2014. – 323 с.
3. Microstructural imaging and characterization of oil shale before and after pyrolysis / T. Saif, Q. Lin, B. Bijeljic, M.J. Blunt // Fuel. – 2017. – V. 197. – P. 562–574.
4. 4D in situ synchrotron X-ray tomographic microscopy and laser-based heating study of oil shale pyrolysis / T. Saif, Q. Lin, Y. Gaoa, Y. Al-Khulaifia, F. Maroneb, D. Hollisc, M.J. Blunt, B. Bijeljic // Applied Energy. – 2019. – V. 235. – P. 1468–1475.
5. Primary understanding of non-isothermal pyrolysis behavior for oil shale kerogen using reactive molecular dynamics simulation / Y. Qian, J.-H. Zhan, D. Lai, M. Li, X. Liu, G. Xu // International journal of hydrogen energy. – 2016. – V. 41. – P. 12093–12100.
6. Burnham A.K. Porosity and permeability of Green River oil shale and their changes during retorting // Fuel. – 2017. – V. 203. – P. 208–213.
7. Kar T., Hascakir B. In-situ kerogen extraction via combustion and pyrolysis // Journal of Petroleum Science and Engineering. – 2017. – V. 154. – P. 502–512.
8. Modeling study on effects of intraparticle mass transfer and secondary reactions on oil shale pyrolysis / Y. Huang, M. Zhang, J. Lyu, H. Yang, Q. Liu // Fuel. – 2018. – V. 221. – P. 240–248.
9. Quantification of organic content in shales via near-infrared imaging: Green River Formation / Y. Mehmani, A.K. Burnham, M.D.V. Berg, H.A. Tchelepi // Fuel. – 2017. – V. 208. – P. 337–352.
10. Tiwari P., Deo M. Compositional and kinetic analysis of oil shale pyrolysis using TGA–MS // Fuel. – 2012. – V. 94. – P. 333–341.
11. Salmon E., Behar F., Hatcher P.G. Molecular characterization of Type I kerogen from the Green River Formation using advanced NMR techniques in combination with electrospray ionization/ultrahigh resolution mass spectrometry // Organic Geochemistry. – 2011. – V. 42. – P. 301–315.
12. Milliken K.L., Zhang T., Ni J.Y. Chen Mineral diagenetic control of expulsion efficiency in organic-rich mudrocks, Bakken Formation (Devonian-Mississippian), Williston Basin, North Dakota, U.S.A. // Marine and Petroleum Geology. – 2021. – V. 127. – P. 1–24.
13. Paleoenvironment and source-rock potential of the Cenomanian-Turonian Eagle Ford Formation in the Sabinas basin, northeast Mexico / J.J. Enciso-Cardenas, F. Núnez-Useche, L.F.C. Ortegon, G. de la Rosa-Rodríguez, M. Martínez-Yanez, A.G. Borrego // Journal of South American Earth Sciences. – 2021. – V. 108. – P. 1–14.
14. Jiang S., Mokhtari M. Characterization of marl and interbedded limestone layers in the Eagle Ford Formation, DeWitt county, Texas // Journal of Petroleum Science and Engineering. – 2019. – V. 172. – P. 502–510.
15. Milliken K.L., Ergenea S.M., Ozkan A. Quartz types, authigenic and detrital, in the Upper Cretaceous Eagle Ford Formation, South Texas, USA // Sedimentary Geology. – 2016. – V. 339. – P. 273–288.
16. Geochemical evidence of organic matter source input and depositional environments in the lower and upper Eagle Ford Formation, south Texas / X. Sun, T. Zhang, Y. Sun, K.L. Milliken, D. Sun // Organic Geochemistry. – 2016. – V. 98. – P. 66–81.
17. Gentzis T. Review of the hydrocarbon potential of the Steele Shale and Niobrara Formation in Wyoming, USA: A major

unconventional resource play? // International Journal of Coal Geology. – 2016. – V. 166. – P. 118–127.
18. Compositional fractionation of petroleum from reservoir to wellhead in the Niobrara shale oil play / Y. Han, B. Horsfield, N. Mahlstedt, H. LaReau, D.J. Curry // International Journal of Coal Geology. – 2018. – V. 198. – P. 156–166.
19. Классификация пород баженовской свиты / А.Э. Конторович, П.А. Ян, А.Г. Замирайлова, Е.А. Костырева, В.Г. Эдер // Геология и геофизика. – 2016. – Т. 57. – № 11. – С. 2034–2043.
20. Стратификация и детальная корреляция баженовского горизонта в центральной части Западной Сибири по данным литолого-палеонтологического изучения керна и ГИС / И.В. Панченко, В.Д. Немова, М.Е. Смирнова, М.В. Ильина, Е.Ю. Барабошкин, В.С. Ильин // Геология нефти и газа. – 2016. – № 6. – С. 22–34.
21. Литолого-геохимические свидетельства катагенетических преобразований черных сланцев на примере баженовской свиты Западной Сибири / В.Г. Эдер, Н.С. Балушкина, А.Г. Замирайлова, А.Н. Фомин // Вестник Московского университета. Серия 4: Геология. – 2021. – № 1. – С. 58–70.
22. Основные типы разрезов нефтеносной баженовской свиты на северо-востоке Сургутского свода / Н.И. Коробова, О.М. Макарова, Г.А. Калмыков, Н.Н. Петракова, А.Ю. Юрченко, В.Ф. Шарафутдинов, С.Р. Корост, В.В. Калабин // Вестник Московского университета. Серия 4: Геология. – 2015. – № 5. – С. 54–61.
23. Эдер В.Г., Замирайлова А.Г., Жигульский И.А. Литология баженовской свиты в районах Хантейской гемиантеклизы и Межовского мегамыса Западно-Сибирского нефтегазоносного бассейна // Геология нефти и газа. – 2016. – № 6. – С. 87–96.
24. Новые данные о литологии, органической геохимии и условиях формирования баженовской свиты Западной Сибири / В.Г. Эдер, Е.А. Костырева, А.Ю. Юрченко, Н.С. Балушкина, И.С. Сотнич, Е.В. Козлова, А.Г. Замирайлова, Н.И. Савченко // Георесурсы. – 2019. – Т. 21. – № 2. – С. 129–142.
25. Модели седиментации баженовской свысокоуглеродистой формации в зоне развития тутлеймской и баженовской свит / О.В. Хотылев, Ю.А. Гатовский, Н.С. Балушкина, Ю.А. Коточкова, Н.И. Коробова, М.А. Фомина, Е.В. Карпова, Г.А. Калмыков // Георесурсы. – 2021. – Т. 23. – № 2. – С. 120–131.
26. Identifying organic-rich Marcellus Shale lithofacies by support vector machine classifier in the Appalachian basin / G. Wang, T.R. Carr, Y. Ju, C. Li // Computers and Geosciences. – 2014. – V. 64. – P. 52–60.
27. Evaluation of machine learning methods for lithology classification using geophysical data / T.S. Bressan, M.K. Souza, T.J. Girelli, F.J. Chemale // Computers and Geosciences. – 2020. – V. 139. – P. 1–13.
28. Павлова М.А., Эдер В.Г., Замирайлова А.Г. Модель баженовской свиты на примере данных участка Салымского месторождения // Геология нефти и газа. – 2015. – № 3. – С. 57–62.
29. Калмыков Г.А., Балушкина Н.С. Модель нефтенасыщенности порового пространства пород баженовской свиты Западной Сибири и ее использование для оценки ресурсного потенциала. – М.: ГЕОС, 2017. – 246 с.
30. Основные типы пород баженовской свиты на Сургутском своде и сопредельных территориях / О.М. Макарова, Н.И. Коробова, А.Г. Калмыков, Г.А. Калмыков, Н.С. Балушкина, В.С. Белохин, Е.В. Козлова, В.Л. Косоруков, Е.А. Мануилова // Георесурсы. – 2017. – Спецвыпуск. – Ч. 2. – С. 155–164.
31. Немова В.Д. Многоуровневая литологическая типизация пород баженовской свиты // Нефтяное хозяйство. – 2019. – № 8. – С. 13–17.
32. Глинских В.Н., Федосеев А.А. Новый подход к литолого-электрофизической интерпретации данных электромагнитных зондирований в интервалах баженовской свиты // Геология и минерально-сырьевые ресурсы Сибири. – 2019. – № 4. – С. 80–88.
33. Частотная дисперсия электрофизических характеристик и электрическая анизотропия пород баженовской свиты по данным электрокаротажа / М.И. Эпов, В.Н. Глинских, А.М. Петров, К.В. Сухорукова, А.А. Федосеев, О.В. Нечаев, М.Н. Никитенко // Нефтяное хозяйство. – 2019. – № 9. – С. 62–64.
34. Эдер В.Г. Пиритизация пород зон перехода черносланцевой толщи к вмещающим отложениям на примере баженовской свиты Западной Сибири // Литология и полезные ископаемые. – 2020. – № 3. – С. 257–271.
35. Временное методическое руководство по подсчету запасов нефти в трещинных и трещинно-поровых коллекторах в отложениях баженовской толщи Западно-Сибирской нефтегазовой провинции // Недропользование XXI век. – 2017. – № 4. – С. 68–101.
36. Программа MINLITH для расчета минерального состава осадочных пород: достоверность результатов в применении к отложениям древних платформ / О.М. Розен, А.А. Аббясов, А.А. Мигдисов, А.А. Ярошевский // Геохимия. – 2000. – № 4. – С. 431–444.
37. Неручев С.Г. Эпохи радиоактивности в истории Земли и развитие биосферы // Геология и геофизика. – 1976. – № 5. – С. 3–13.
38. Неручев С.Г. Взаимосвязь эпох накопления органического вещества и урана с рубежами развития органического мира // Геохимия современных ископаемых осадков: VIII Международный конгресс по органической геохимии. – М.: Изд-во «Наука» 1982. – С. 5–15.
39. Плуман И.И. Ураноносность черных битуминозных аргиллитов верхней юры Западно-Сибирской плиты // Геохимия. – 1971. – № 11. – С. 1362–1368.
40. Хабаров В.В., Нелепченко О.М., Первухина Т.М. Выделение проницаемых интервалов в породах баженовской свиты Салымского нефтяного месторождения // Геология нефти и газа. – 1978. – № 8. – С. 15–18.
41. Парфенова Т.М., Меленевский В.Н., Москвин В.И. Использование гамма-каротажа для определения содержания органического вещества в высокоуглеродистых осадочных формациях (на примере баженовской свиты) // Нефтяная и газовая промышленность. Геология, геофизика и разработка нефтяных месторождений. – 1999. – № 11. – С. 29–34.

*Поступила: 03.09.2021 г.*

**Информация об авторах**

***Фомин М.А.***, кандидат геолого-минералогических наук, заведующий лабораторией, Институт нефтегазовой геологии и геофизики им. А.А. Трофимука СО РАН; старший преподаватель кафедры геологии месторождений нефти и газа Геолого-геофизического факультета, Новосибирский государственный университет.

***Костырева Е.А.***, кандидат геолого-минералогических наук, старший научный сотрудник, Институт нефтегазовой геологии и геофизики им. А.А. Трофимука СО РАН.

***Рыжкова С.В.***, кандидат геолого-минералогических наук, старший научный сотрудник, Институт нефтегазовой геологии и геофизики им. А.А. Трофимука СО РАН; доцент кафедры геологии месторождений нефти и газа Геолого-геофизического факультета, Новосибирский государственный университет.

***Саитов Р.М.***, младший научный сотрудник, Институт нефтегазовой геологии и геофизики им. А.А. Трофимука СО РАН.

***Сотнич И.С.***, научный сотрудник, Институт нефтегазовой геологии и геофизики им. А.А. Трофимука СО РАН.

***Эдер В.Г.***, кандидат геолого-минералогических наук, старший научный сотрудник, Институт нефтегазовой геологии и геофизики им. А.А. Трофимука СО РАН.

UDC 553.983

# LITHOLOGICAL MODEL OF THE BAZHENOV FORMATION BASED ON INTEGRATED INTERPRETATION OF GEOLOGICAL AND GEOPHYSICAL MATERIALS

**Mikhail A. Fomin**[1,2],
FominMA@ipgg.sbras.ru

**Elena A. Kostyreva**[1],
KostyrevaEA@ipgg.sbras.ru

**Svetlana V. Ryzhkova**[1,2],
RizhkovaSV@ipgg.sbras.ru

**Rashid M. Saitov**[1],
SaitovRM@ipgg.sbras.ru

**Inga S. Sotnich**[1],
SotnichIS@ipgg.sbras.ru

**Vika G. Eder**[1],
EderVG@ipgg.sbras.ru

[1] Trofimuk Institute of Petroleum Geology and Geophysics SB RAS,
3, Ak. Koptyug avenue, Novosibirsk, 630090, Russia.

[2] Novosibirsk State University,
1, Pirogov street, Novosibirsk, 630090, Russia.

***The relevance*** *of the study is associated with the need to develop and improve technological methods for increasing oil production from the Bazhenov Formation in relation to the depletion of reserves in traditional granular reservoirs in the West Siberian oil and gas province. The features of the industrial development of these low-permeability rocks largely depend on their mineral-component composition. To identify different types of reservoirs of the Bazhenov Formation in wells that are not characterized by core material, it is necessary to develop a method for predicting its lithological composition.*
***The main aim:*** *to identify and study the relationships between the mineral component composition, and electrical rocks and radioactive properties of Bazhenov Formation in the central part of the West Siberian sedimentary basin for developing methods of calculating the content of basic rock-forming components in this formation section.*
***The object*** *of the research is the carbonate-argillaceous-siliceous rocks of the Bazhenov Formation, characterized by a large heterogeneity of the mineral-component composition along the section.*
***Methods:*** *identification of relationships between the mineral-component composition of the rocks of the Bazhenov Formation and its electrical and radioactive properties; statistical analysis of the obtained relations; calculation on their basis of the lithological composition of the Bazhenov rocks in the base, as well as in adjacent wells.*
***Results.*** *The article presents the results of an integrated lithological and geophysical interpretation of data from a wide range of electrical and radioactive logging and the results of analytical core studies, on the basis of which a methodological approach to calculating the concentrations of the main rock-forming components of the Bazhenov Formation has been developed. It is based on the identified relationships between the mineral-component composition of rocks and their physical properties. Satisfactory convergence of the calculated values and core data is shown, volumetric lithological models are built for the wells of the Druzhnaya and Povkhovskaya areas. It is shown that the obtained dependences can be used to reliably calculate the lithological composition of the Bazhenov Formation in closely spaced wells that are not characterized by core material. The impossibility of using the proposed methodological approach in thin-layered sections is substantiated due to the fact that the thickness of the interlayers is much less than the resolving power of geophysical borehole probes.*

***Key words:***
*Bazhenov Formation, West Siberia, core, well-logging data, lithological composition, methodical approach.*

*Interconnection and substantiation of physical relationships between the mineral-component composition of the Bazhenov formation and the values of electrical and radioactive logging was funded by RFBR, project number 20-35-90049. Approbation of the methodological approach for calculating the concentrations of the main rock-forming components of the Bazhenov formation based on the identified core-logging relationships was implemented with the financial support of the research project FWZZ-2022-0012 of the FSI program.*

## REFERENCES

1. Soeder D.J., Borglum S.J. *The fossil fuel revolution: shale gas and tight oil*. Eastbourne, Elsevier, 2019. 336 p.
2. Prischepa O.M., Averyanova O.Yu., Ilyinsky A.A., Morariu D. *Neft i gaz nizkopronitsaemykh slancevykh tolshch – rezerv syrevoy bazy uglevodorodov Rossii* [Oil and gas of low-permeable shale strata - a reserve of the raw hydrocarbon base of Russia]. St. Petersburg, FSUE «VNIGRI» Publ. house, 2014. 323 p.
3. Saif T., Lin Q., Bijeljic B., Blunt M.J. Microstructural imaging and characterization of oil shale before and after pyrolysis. *Fuel*, 2017, vol. 197, pp. 562–574.

4. Saif T., Lin Q., Gaoa Y., Al-Khulaifia Y., Maroneb F., Hollisc D., Blunt M.J., Bijeljic B. 4D in situ synchrotron X-ray tomographic microscopy and laser-based heating study of oil shale pyrolysis. *Applied Energy*, 2019, vol. 235, pp. 1468–1475.
5. Qian Y., Zhan J.-H., Lai D., Li M., Liu X., Xu G. Primary understanding of non-isothermal pyrolysis behavior for oil shale kerogen using reactive molecular dynamics simulation. *International journal of hydrogen energy*, 2016, vol. 41, pp. 12093–12100.
6. Burnham A.K. Porosity and permeability of Green River oil shale and their changes during retorting. *Fuel*, 2017, vol. 203, pp. 208–213.
7. Kar T., Hascakir B. In-situ kerogen extraction via combustion and pyrolysis. *Journal of Petroleum Science and Engineering*, 2017, vol. 154, pp. 502–512.
8. Huang Y., Zhang M., Lyu J., Yang H., Liu Q. Modeling study on effects of intraparticle mass transfer and secondary reactions on oil shale pyrolysis. *Fuel*, 2018, vol. 221, pp. 240–248.
9. Mehmani Y., Burnham A.K., Berg M.D.V., Tchelepi H.A. Quantification of organic content in shales via near-infrared imaging: Green River Formation. *Fuel*, 2017, vol. 208, p. 337–352.
10. Tiwari P., Deo M. Compositional and kinetic analysis of oil shale pyrolysis using TGA–MS. *Fuel*, 2012, vol. 94, pp. 333–341.
11. Salmon E., Behar F., Hatcher P.G. Molecular characterization of Type I kerogen from the Green River Formation using advanced NMR techniques in combination with electrospray ionization/ultrahigh resolution mass spectrometry. *Organic Geochemistry*, 2011, vol. 42, pp. 301–315.
12. Milliken K.L., Zhang T., Chen J., Ni Y. Mineral diagenetic control of expulsion efficiency in organic-rich mudrocks, Bakken Formation (Devonian-Mississippian), Williston Basin, North Dakota, U.S.A. *Marine and Petroleum Geology*, 2021, vol. 127, pp. 1–24.
13. Enciso-Cardenas J.J., Núnez-Useche F., Ortegon L.F.C., de la Rosa-Rodríguez G., Martínez-Yanez M., Borrego A.G. Paleoenvironment and source-rock potential of the Cenomanian-Turonian Eagle Ford Formation in the Sabinas basin, northeast Mexico. *Journal of South American Earth Sciences*, 2021, vol. 108, pp.1–14.
14. Jiang S., Mokhtari M. Characterization of marl and interbedded limestone layers in the Eagle Ford Formation, DeWitt county, Texas. *Journal of Petroleum Science and Engineering*, 2019, vol. 172, pp. 502–510.
15. Milliken K.L., Ergenea S.M., Ozkan A. Quartz types, authigenic and detrital, in the Upper Cretaceous Eagle Ford Formation, South Texas, USA. *Sedimentary Geology*, 2016, vol. 339, pp. 273–288.
16. Sun X., Zhang T., Sun Y., Milliken K.L., Sun D. Geochemical evidence of organic matter source input and depositional environments in the lower and upper Eagle Ford Formation, south Texas. *Organic Geochemistry*, 2016, vol. 98, pp. 66–81.
17. Gentzis T. Review of the hydrocarbon potential of the Steele Shale and Niobrara Formation in Wyoming, USA: A major unconventional resource play? *International Journal of Coal Geology*, 2016, vol. 166, pp. 118–127.
18. Han Y., Horsfield B., Mahlstedt N., LaReau H., Curry D.J. Compositional fractionation of petroleum from reservoir to wellhead in the Niobrara shale oil play. *International Journal of Coal Geology*, 2018, vol. 198, pp. 156–166.
19. Kontorovich A.E., Yan P.A., Zamirailova A.G., Kostyreva E.A., Eder V.G. Classification of rocks of the Bazhenov Formation. *Russian Geology and Geophysics*, 2016, vol. 57, no. 11, pp. 1606–1612.
20. Panchenko I.V., Nemova V.D., Smirnova M.E., Ilyina M.V., Baraboshkin E.Yu., Ilyin V.S. Stratification and detailed correlation of the Bazhenov horizon in the central part of Western Siberia according to the lithological and paleontological study of core and GIS. *Geology of oil and gas*, 2016, no. 6, pp. 22–34. In Rus.
21. Eder V.G., Balushkina N.S., Zamirailova A.G., Fomin A.N. Lithological and geochemical evidence of catagenetic transformations in black shales based on the example of the Western Siberian Bazhenov Formation. *Moscow University Geology Bulletin*, 2021, vol. 76, pp. 163–175.
22. Korobova N.I., Makarova O.M., Kalmykov G.A., Petrakova N.N., Yurchenko A.Yu., Sharafutdinov V.F., Korost S.R., Kalabin V.V. The main types of sections of the oil-bearing Bazhenov formation in the north-east of the Surgut arch. *Moscow University Geology Bulletin*, 2015, vol. 70, no. 5, pp. 54–61.
23. Eder V.G., Zamirailova A.G., Zhigulsky I.A. Lithology of the Bazhenov Formation in the Khanteyskaya Hemianteclise and Mezhovsky Megamys of the West Siberian Oil and Gas Basin. *Geology of oil and gas*, 2016, no. 6, pp. 87–96. In Rus.
24. Eder V.G., Kostyreva E.A., Yurchenko A.Yu., Balushkina N.S., Sotnich I.S., Kozlova E.V., Zamirailova A.G., Savchenko N.I. New data on lithology, organic geochemistry and conditions for the formation of the Bazhenov formation in Western Siberia. *Georesources*, 2019, vol. 21, no. 2, pp. 129–142. In Rus.
25. Khotylev O.V., Gatovsky Yu.A., Balushkina N.S., Kotochkova Yu.A., Korobova N.I., Fomina M.A., Karpova E.V., Kalmykov G.A. Models of sedimentation of the Bazhenov high-carbon formation in the development zone of the Tutleim and Bazhenov formations. *Georesources*, 2021, vol. 23, no. 2, pp. 120–131. In Rus.
26. Wang G., Carr T.R., Ju Y., Li C. Identifying organic-rich Marcellus Shale lithofacies by support vector machine classifier in the Appalachian basin. *Computers and Geosciences*, 2014, vol. 64, pp. 52–60.
27. Bressan T.S., Souza M.K., Girelli T.J., Chemale F.J. Evaluation of machine learning methods for lithology classification using geophysical data. *Computers and Geosciences*, 2020, vol. 139, pp. 1–13.
28. Pavlova M.A., Eder V.G., Zamirailova A.G. Model of the Bazhenov formation on the example of data from the Salym field. *Geology of oil and gas*, 2015, no. 3, pp. 57–62. In Rus.
29. Kalmykov G.A., Balushkina N.S. *Model neftenasyshchennosti porovogo prostranstva porod bazhenovskoy svity Zapadnoy Sibiri i ee ispolzovanie dlya otsenki resursnogo potentsiala* [A model of oil saturation in the pore space of the rocks of the Bazhenov Formation in Western Siberia and its use for assessing the resource potential]. Moscow, GEOS Publ., 2017. 246 p.
30. Makarova O.M., Korobova N.I., Kalmykov A.G., Kalmykov G.A., Balushkin N.S., Belokhin V.S., Kozlova E.V., Kosorukov V.L., Manuilova E.A. The main types of rocks of the Bazhenov Formation in the Surgut arch and adjacent territories. *Georesources*, 2017, Special Iss., P. 2, pp. 155–164. In Rus.
31. Nemova V.D. Multilevel lithological typification of rocks of the Bazhenov Formation. *Oil Industry*, 2019, no. 8, pp. 13–17. In Rus.
32. Glinskikh V.N., Fedoseev A.A. A new approach to lithoelectrophysical interpretation of electromagnetic sounding data in the Bazhenovskaya Formation intervals. *Geology and Mineral Resources of Siberia*, 2019, no. 4, pp. 80–88. In Rus.
33. Epov M.I., Glinskikh V.N., Petrov A.M., Sukhorukova K.V., Fedoseev A.A., Nechaev O.V., Nikitenko M.N. Frequency dispersion of electrophysical characteristics and resistivity anisotropy of the Bazhenov formation deposits according to resistivity logging data. *Oil Industry*, 2019, no. 9, pp. 62–64. In Rus.
34. Eder V.G. Pyritization of rocks in black shale/host rock transition zones: evidence from the Bazhenov Formation, Western Siberia. *Lithology and Mineral Resources*, 2020, vol. 55, no. 3, pp. 218–230. In Rus.
35. Vremennoe metodicheskoe rukovodstvo po podschetu zapasov nefti v treshchinnykh i treshchinno-porovykh kollektorakh v otlozheniyakh bazhenovskoy tolshchi Zapadno-Sibirskoy neftegazovoy provintsii [Temporary guidelines for calculating oil reserves in fractured and fractured-porous reservoirs in the sediments of the Bazhenov strata of the West Siberian oil and gas province]. *Subsoil use XXI century*, 2017, no. 4, pp. 68–101.
36. Rosen O.M., Abbyasov A.A., Migdisov A.A., Yaroshevsky A.A. MINLITH program for calculating the mineral composition of sedimentary rocks: the reliability of the results as applied to the sediments of ancient platforms. *Geochemistry*, 2000, no. 4, pp. 431–444. In Rus.
37. Neruchev S.G. Epochs of radioactivity in the history of the Earth and the development of the biosphere. *Russian Geology and Geophysics*, 1976, no. 5, pp. 3–13. In Rus.
38. Neruchev S.G. Vzaimosvyaz epokh nakopleniya organicheskogo veshchestva i urana s rubezhami razvitiya organicheskogo mira [The relationship of the epochs of organic matter and uranium accumulation with the boundaries of development of the organic world]. *VIII Mezhdunarodny kongress po organicheskoy geokhimii. Geokhimiya sovremennykh iskopaemykh osadkov* [VIII International Congress on Organic Geochemistry. Geochemistry of modern fossil sediments]. Moscow, Nauka Publ., 1982. pp. 5–15.
39. Pluman I.I. Uranium content of black bituminous mudstones of the Upper Jurassic of the West Siberian plate. *Geochemistry*, 1971, no. 11, pp. 1362–1368. In Rus.
40. Khabarov V.V., Nelepchenko O.M., Pervukhina T.M. Allocation of permeable intervals in the rocks of the Bazhenov Formation of

the Salym oil field. *Geology of oil and gas*, 1978, no. 8, pp. 15–18. In Rus.

41. Parfenova T.M., Melenevsky V.N., Moskvin V.I. The use of gamma-ray logging to determine the content of organic matter in high-carbon sedimentary formations (for example, the Bazhenov suite). *Oil and Gas Industry. Geology, geophysics and oil field development*, 1999, no. 11, pp. 29–34. In Rus.

*Received: 3 September 2021.*

**Information about the authors**

***Mikhail A. Fomin***, Cand. Sc., head of the laboratory, Trofimuk Institute of Petroleum Geology and Geophysics SB RAS; senior lecturer, Novosibirsk State University.

***Elena A. Kostyreva***, Cand. Sc., senior researcher, Trofimuk Institute of Petroleum Geology and Geophysics SB RAS.

***Svetlana V. Ryzhkova***, Cand. Sc., senior researcher, Trofimuk Institute of Petroleum Geology and Geophysics SB RAS; assistant professor, Novosibirsk State University.

***Rashid M. Saitov***, junior researcher, Trofimuk Institute of Petroleum Geology and Geophysics SB RAS.

***Inga S. Sotnich***, researcher, Trofimuk Institute of Petroleum Geology and Geophysics SB RAS.

***Vika G. Eder***, Cand. Sc., senior researcher, Trofimuk Institute of Petroleum Geology and Geophysics SB RAS.

УДК 622.276.53

# ДИНАМИЧЕСКИЕ СИМУЛЯТОРЫ В ЗАДАЧАХ ДИАГНОСТИКИ ШТАНГОВЫХ ГЛУБИННО-НАСОСНЫХ УСТАНОВОК

**Зюзев Анатолий Михайлович**[1],
a.m.zyuzev@urfu.ru

**Самуэль Исаак Текле**[1],
samuel47tecle@gmail.com

[1] Уральский федеральный университет,
Россия, 620002, г. Екатеринбург, ул. Мира, 19.

***Актуальность.*** *Эффективность работы штанговых глубинно-насосных установок во многом зависит от качества системы мониторинга и диагностики неисправностей агрегата. Когда штанговый насос эксплуатируется в критических рабочих состояниях, частота отказов оборудования увеличивается, а эффективность производства снижается. Кроме того, поскольку штанговый насос работает глубоко под землей, затраты на его ремонт и обслуживание весьма высокие, а добыча при этом прерывается на длительное время. Следовательно, улучшение системы мониторинга и диагностики работы штангового насоса является важной задачей. Информация о рабочем состоянии штангового насоса отражается в динамограмме усилий в подвеске колонны штанг и в диаграмме мгновенной мощности двигателя – ваттдиаграмме. Мониторинг штангового насоса с использованием диаграммы мощности двигателя более эффективен, чем динамометрирование, так как его можно использовать для оценки состояния как наземного, так и подземного оборудования. Кроме того, диаграмма мощности двигателя, в отличие от динамограммы, получается с помощью более простых и надежных средств измерений тока и напряжения. Таким образом, диаграмму мощности двигателя можно признать лучшим альтернативным методом для разработки оперативных систем мониторинга и диагностики для штанговых насосных установок.*

***Основная цель:*** *рассмотреть проблемы построения диагностических моделей с использованием диаграммы мощности двигателя штанговых глубинно-насосных установок.*

***Объекты:*** *электропривод, штанговая насосная установка, нефтедобывающая скважина.*

***Методы:*** *имитационное моделирование; метод извлечения признаков, который создает вектор признаков для уникального представления каждого рабочего состояния – метод опорных векторов.*

***Результаты.*** *Проанализированы 72 расчётных диаграммы мощности двигателя, представляющие шесть рабочих состояний, а именно: нормальное рабочее состояние; утечка всасывающего клапана; воздействие газа; недостаточная подача жидкости; низкая и высокая посадка плунжера. Показано, что вектор признаков, построенный на основе оценки мощности в момент переключения клапанов, уникально представляет каждое рабочее состояние. Также было замечено, что метод опорных векторов правильно классифицирует образцы в нормальном режиме работы штанговых глубинно-насосных установок, утечки во впускном клапане и заполнение насоса газом. Однако некоторые образцы с недостаточной подачей жидкости были ошибочно классифицированы как заполнение насоса газом или нормальные.*

***Ключевые слова:***
*Штанговый насос, извлечение признаков, динамограмма, диагностика неисправностей*

## Введение

Штанговый насос является наиболее распространенной установкой механизированного подъема пластовой жидкости в нефтяной промышленности. В [1, 2] показано, что около 90 % нефтяных скважин в США, 80 % нефтяных скважин в мире оборудованы штанговыми глубинно-насосными установками (ШГНУ). Причины преобладания штанговых насосов связаны с простотой их использования и высокой эффективностью. Однако диагностика неисправностей и обслуживание штанговых насосов – дело дорогостоящее и сложное.

Известно более 20 различных рабочих состояний ШГНУ, которые могут быть визуально определены экспертами в данной предметной области [3]. Стоимость эксплуатации штангового насоса возрастает, если он работает в некоторых нештатных состояниях. Следовательно, создание системы эффективного мониторинга работы штангового насоса является важной задачей. Динамограмма важна для контроля рабочего состояния штангового насоса. Различные условия работы штанговых насосов можно представить разными формами динамограмм [4]. Традиционно опытный технический персонал диагностирует состояние ШГНУ по виду динамограмм. Однако этот метод неэффективен, поскольку он практически исключает мониторинг в реальном времени, а на результат влияет субъективный опыт эксперта.

В ряде работ, таких как [4–7] и т. д., для повышения эффективности мониторинга ШГНУ была предпринята попытка автоматизировать систему диагностики неисправностей с использованием методов машинного обучения. Для этого предлагается выполнять извлечение характерных признаков процесса с последующей классификацией для решения задачи диагностики неисправностей. На основе средств обработки данных известные подходы можно разделить на контролируемое обучение, которое требует участия человека для обработки данных, и неконтролируемое обучение, которое позволяет обрабатывать данные без участия человека. При использовании контролируемых и неконтролируемых методов обучения предполагается, что доступные образцы соответствуют требованиям обучающей выборки. Однако


DOI 10.18799/24131830/2022/1/3285

этого трудно достичь в реальных условиях, потому что только несколько из возможных рабочих состояний возникают на ранних сроках эксплуатации скважин, а образцы из разных скважин не всегда имеют одинаковое распределение. Более того, неправильная динамометрическая карта может быть получена из-за неправильной калибровки, конфигурации или настройки датчиков положения штока, кривошипа или вала двигателя.

Диаграмму мощности двигателя предлагается использовать в качестве альтернативного источника данных для диагностики штангового насоса [8, 9]. Мониторинг штангового насоса с использованием ваттдиаграммы более эффективен, чем на основе динамограммы, так как её можно использовать для мониторинга как наземного, так и подземного оборудования. Например, состояние балансировки агрегата однозначно отражается на диаграмме мощности двигателя [10]. Кроме того, ваттдиаграмма получается с помощью более простых средств измерения тока и напряжения двигателя. Однако следует отметить, что не существует признанной связи между диаграммой мощности двигателя и диагностируемыми состояниями, хотя эффекты всех возможных состояний подземной и наземной частей ШГНУ отражаются в диаграмме мощности двигателя в соответствующие моменты времени.

Образцы диагностируемых состояний, созданные с помощью компьютерной модели, могут решить проблемы, связанные с требованиями к обучению и трудностями при маркировке диаграмм мощности двигателя. Модель ШГНУ можно разделить на модель наземной части привода, модель движения колонны штанг с плунжерным насосом и модель геологической среды [11]. Многомассовое последовательно-распределённое представление колонны насосных штанг и НКТ описывает их возвратно-поступательное движение [12]. Решение модели движения колонны насосных штанг определяет состояние штангового насоса, при этом параметры жидкости в скважине существенно влияют на результаты решения задачи.

### Устройство и анализ работы штанговой глубинно-насосной установки

В состав оборудования штангового насоса входит приводной двигатель, редуктор, наземное насосное оборудование, колонна насосных штанг, насосно-компрессорных труб (НКТ) и собственно плунжерный насос. В большинстве ШГНУ в качестве источника движущего усилия применяется электродвигатель, момент от которого через клиноременную передачу и редуктор передаётся на вал кривошипного механизма [13]. В наземной части насосной установки используется четырёхплечий шарнирный механизм для преобразования вращательного движения кривошипа в возвратно-поступательное движение насосных штанг. Собственно насос состоит из плунжера в корпусе и клапанного механизма, обеспечивающего преобразование возвратно-поступательного движения плунжера в поступательное движение жидкости.

Динамическое поведение штангового насоса – сложный процесс, в котором задействовано множество взаимозависимых переменных. Клапанный механизм насоса содержит всасывающий (приточный) и нагнетательный (напорный) клапаны. Работа этих клапанов связана с возвратно-поступательным движением полированного штока, передающего движение плунжеру через колонну штанг, и может быть понята из рис. 1, на котором приведены типичные диаграммы перемещения полированного штока ($S_{pht}$), скорости ($v_{pht}$), нагрузки ($F_{pht}$), давления насоса ($p_{НАС}$) и кривой мощности двигателя (P) на одном обороте кривошипа. В нормальном рабочем состоянии нагнетательный клапан закрывается в конце хода вверх, а всасывающий клапан закрывается в конце хода вниз. Однако открытие обоих клапанов зависит от количества свободного газа в насосе. Давление насоса, определяющее нагрузку на плунжер, зависит от состояния этих клапанов. Когда всасывающий клапан открыт, давление насоса почти равно давлению жидкости в скважине и к плунжеру с системой штанг прикладывается только выталкивающая сила. В то время как при открытом нагнетательном клапане давление насоса почти равно давлению нагнетания и на плунжер оказывается большая нагрузка.

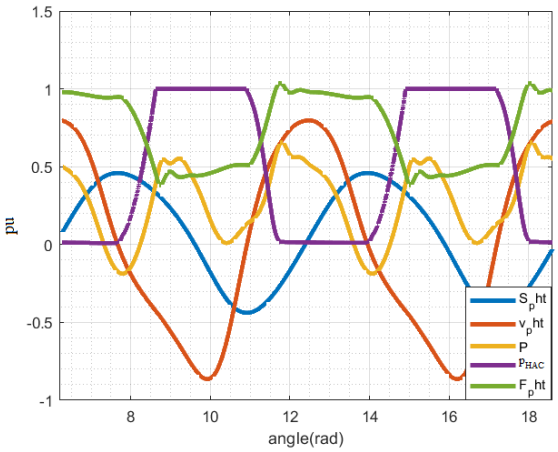



***Рис. 1.*** *Типичные диаграммы механизма*
***Fig. 1.*** *Typical curves for mechanism analysis*

Влияние неравномерной нагрузки на плунжер в цикле качания вызывает периодическое изменение нагрузки на редуктор. Поэтому в большинстве штанговых насосов на кривошипе закреплен противовес для выравнивания воздействия неравномерных нагрузок и уменьшения мощности приводного двигателя. Во время хода штока вниз противовес поднимается, и его потенциальная энергия увеличивается, напротив, во время движения штока вверх противовес опускается, возвращая механизму накопленную энергию. Следовательно, противовес помогает двигателю поднимать вес колонны насосных штанг с жидкостью во время хода вверх и, наоборот, во время хода вниз вес колонны насосных штанг помогает двигателю поднимать противовес. Чередование и расположение экстремумов на диаграмме мощности двигателя может

быть использовано для анализа состояния рабочего процесса штангового насоса.

### Проблемы мониторинга штанговых глубинно-насосных установок

Использование надежной системы мониторинга, диагностики неисправностей и средств автоматического управления необходимо для поддержания работы штангового насоса в нормальном рабочем состоянии, поскольку его эксплуатация в критических режимах может привести к увеличению частоты отказов оборудования или снижению его производительности. Большинство частных критических рабочих состояний ШГНУ связано с проблемами в подземной части оборудования. Усилие в колонне насосных штанг реагирует на воздействие этих проблем, отображаясь в мгновенной мощности приводного двигателя. По этой очевидной причине наземная динамограмма была первым инструментом для мониторинга подземной части штангового насоса. Известно, что информация о рабочих состояниях штангового насоса содержится в форме динамограммы. Например, замкнутая кривая вида параллелограмма характеризует нормальное рабочее состояние насоса; выпуклость в нижнем левом углу характеризует состояние, при котором плунжер ударяется в корпус насоса в нижней мертвой точке (низкая посадка плунжера); параболическая кривая в верхней части характеризует эффект утечки всасывающего клапана; наоборот, нисходящая дуга означает эффект протечки нагнетательного клапана; на кривой недостаточной подачи жидкости (неполное заполнение насоса) отсутствует правый нижний угол. Таким образом, анализ формы динамограммы без прямого доступа к подземному оборудованию позволяет определить, в каком состоянии находится штанговый глубинный насос.

Основная проблема с традиционным методом диагностики на основе динамометрической карты (динамограммы) связана с затратами рабочего времени и необходимыми знаниями и опытом в данной области. Кроме того, серьезные проблемы возникают в связи с надежностью и точностью существующих систем динамометрирования. Одним из способов получения динамограмм является использование синхронизированных измерений нагрузки и перемещения полированного штока ШГНУ. Для измерения нагрузки обычно используется проволочный тензодатчик, сконфигурированный по полной мостовой схеме, устанавливаемый в траверсу подвески полированного штока. Диагностика этим методом имеет низкую надежность при стационарной установке датчика, а при выполнении периодического контроля необходимо останавливать агрегат и фиксировать полированный шток для установки датчика. Кроме того, весьма вероятный небольшой дисбаланс мостовой схемы изменяет профиль динамометрической карты. Некорректные динамограммы также получаются из-за неправильной калибровки датчиков измерения положения полированного штока.

Формирование динамограммы на основе электрических измерений потребляемой электродвигателем мощности – еще один способ её получения. Хотя надежность электрических измерений гарантируется, точность расчётной динамограммы снижается, как правило, из-за некорректной конфигурации геометрии насосного агрегата. По сравнению с динамограммой электрические измерения содержат больше полезной информации о состоянии наземной и подземной части ШГНУ. Например, качество балансировки, которое является решающей информацией при вводе в эксплуатацию штанговых насосов, не может быть выявлено напрямую с помощью динамограммы [14]. Однако состояние баланса можно визуально наблюдать на кривой мощности двигателя, сравнивая два пика, имеющихся в одном цикле откачки. Поскольку жесткость механических характеристик двигателя довольно высокая, нагрузка на полированный шток возрастает в точках, близких к нижней и верхней мертвой точке. Важным свойством диаграммы мощности двигателя ШГНУ является её цикличность с периодом, равным времени двойного хода полированного штока. Таким образом, эффекты изменения нагрузки насоса периодически повторяются и отражаются на диаграмме мощности двигателя в соответствующие моменты времени. Это указывает на многообещающий потенциал использования диаграммы мощности двигателя для мониторинга и диагностики состояния штанговых глубинных насосов. Однако при разработке диагностической модели штангового насоса на основе оценки мгновенной мощности возникают определённые проблемы, препятствующие разработке эффективной системы мониторинга и диагностики.

Рабочий цикл подземного насоса весьма сложен. Масса и объем газа в насосе непрерывно изменяются в зависимости от таких переменных, как перемещение плунжера и уровень жидкости в скважине. Из-за этих особенностей работы штангового насоса доступные для контроля переменные не могут гарантировать точность оценки рабочего состояния. Кроме того, возможно, что одни и те же состояния насоса могут быть вызваны разными причинами [15]. Таким образом, следует провести более глубокое исследование по выбору характерных признаков, которые лучше всего описывают рабочий процесс ШГНУ.

Модель классификации для системы диагностики выводится из набора обучающих данных. В процессе обучения требуется множество помеченных образцов, чтобы гарантировать точность эффекта распознавания. Однако маркировка данных требует специальных знаний и является затратным по времени процессом. Кроме того, состояние штангового насоса непрерывно изменяется, при этом в течение срока службы скважины возникает лишь несколько рабочих состояний из множества возможных. Следовательно, трудно выполнить требования по обучению на реальной установке.

### Динамический симулятор для штанговых насосов

На рис. 2 представлена структурная схема имитационной модели ШГНУ. Переменными процесса являются приток жидкости, забойное давление, давление всасывания, давление нагнетания, скорость истечения, нагрузка на плунжер, перемещение плунжера,

скорость плунжера, перемещение полированного штока, нагрузка на полированный шток. Подробное пояснение блоков на рис. 2 представлено в следующих разделах.

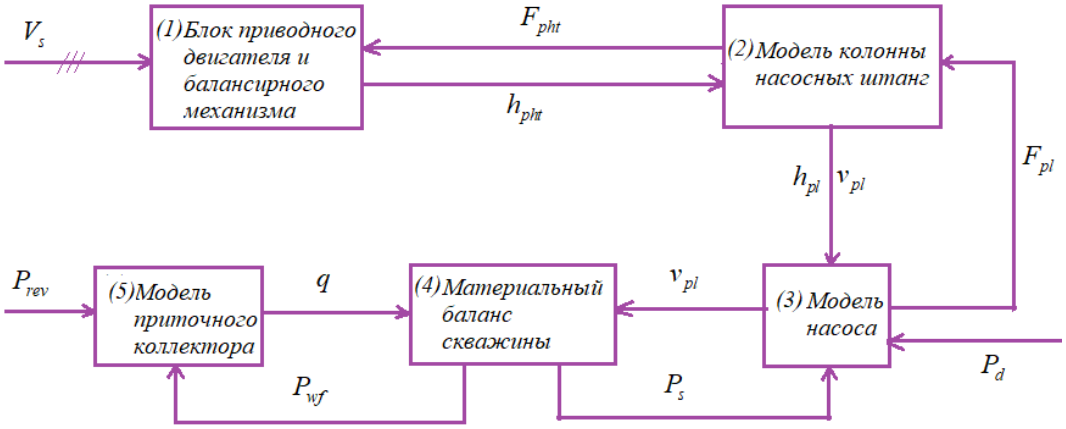



***Рис. 2.*** *Имитационная модель штангового насоса. $V_s$ – напряжение питания; $F_{pht}$ – нагрузка на полированный шток; $h_{pht}$ – перемещение полированного штока; $h_{pl}$ – перемещение плунжера; $v_{pl}$ – скорость плунжера; $F_{pl}$ – нагрузка на плунжер; $P_{rev}$ – пластовое давление; $P_{wf}$ – забойное давление; $P_s$ – давление всасывания; $P_d$ – давление нагнетания; $q$ – скорость потока жидкости*

***Fig. 2.*** *Sucker rod pump simulation model. $V_s$ – supply voltage; $F_{pht}$ – polished rod load; $h_{pht}$ – polished rod displacement; $h_{pl}$ – plunger displacement; $v_{pl}$ – plunger velocity; $F_{pl}$ – load on plunger; $P_{rev}$ – reservoir pressure; $P_{wf}$ – bottomhole pressure; $P_s$ – suction pressure; $P_d$ – discharge pressure; $q$ – liquid flow rate. 1 – prime mover and pumping unit model; 2 – sucker rod string model; 3 – pump model; 4 – material balancing, 5 – reservoir model*

### Модель колонны насосных штанг

Колонна насосных штанг соединяет плунжер подземного насоса с наземным оборудованием. Её длина укорачивается или удлиняется в зависимости от нагрузки на плунжер насоса. Такое поведение позволяет волнам усилия распространяться по её длине. Авторы в [16] использовали одномерное уравнение затухающей волны для аппроксимации движения колонны насосных штанг. Колонну насосных штанг также можно представить как пружинно-демпферную систему, состоящую из распределённых по длине системы элементов «пружина–масса–демпфер» [17]. Система уравнений (1) более применима для моделирования поведения колонны насосных штанг [12].

$$\begin{cases} m_1\ddot{u}_1 = k_o\left(u_o - u_1\right) - k_1\left(u_2 - u_1\right) + \\ \quad + c_o\left(\dot{u}_o - \dot{u}_1\right) - c_1\left(\dot{u}_2 - \dot{u}_1\right); \\ m_2\ddot{u}_1 = k_1\left(u_1 - u_2\right) - k_2\left(u_3 - u_2\right) + \\ \quad + c_1\left(\dot{u}_1 - \dot{u}_2\right) - c_2\left(\dot{u}_3 - \dot{u}_2\right); \\ \vdots \\ m_{n-1}\ddot{u}_{n-1} = k_{n-2}\left(u_{n-2} - u_{n-1}\right) - k_{n-1}\left(u_n - u_{n-1}\right) + \\ \quad + c_{n-2}\left(\dot{u}_{n-2} - \dot{u}_{n-1}\right) - c_{n-1}\left(\dot{u}_n - \dot{u}_{n-1}\right); \\ m_n\ddot{u}_n = k_{n-1}\left(u_{n-1} - u_n\right) + c_{n-1}\left(\dot{u}_{n-1} - \dot{u}_n\right) - F_p\left(t\right), \end{cases} \quad (1)$$

где $c_i$ – коэффициент жесткости; $k_i$ – коэффициент демпфирования элемента; $m_i$ – масса элемента, $u_i$ – перемещение элемента; $F_p$ – усилие на плунжере насоса.

### Блок приводного двигателя и балансирного механизма

Современные системы балансирных приводов штанговых насосов состоят из преобразователя электрической энергии, электродвигателя, клиноременной передачи, шестеренчатого редуктора и четырехзвенного шарнирного механизма сдвоенного типа. В качестве приводного двигателя широко используется асинхронный двигатель. Система уравнений, описывающая динамику асинхронного двигателя в переменных состояния «ток статора ($i_s$) – поток ротора ($\psi_s$)» при известном напряжении питания статора ($u_s$), представленная в [18], приведена в (2):

$$\begin{cases} \dfrac{di_{sA}}{dt} = \dfrac{1}{x_s\sigma}\left(u_{sA} - r_s i_{sA} - k_r\dfrac{d\psi_{rA}}{dt}\right); \\ \dfrac{di_{sB}}{dt} = \dfrac{1}{x_s\sigma}\left(u_{sB} - r_s i_{sB} - k_r\dfrac{d\psi_{rB}}{dt}\right); \\ \dfrac{di_{sC}}{dt} = \dfrac{1}{x_s\sigma}\left(u_{sC} - r_s i_{sC} - k_r\dfrac{d\psi_{rC}}{dt}\right); \\ \dfrac{d\psi_{rA}}{dt} = \alpha_r^{'} i_{sA} - \alpha_r\psi_{rA} + \dfrac{\omega}{\sqrt{3}}\left(\psi_{rC} - \psi_{rB}\right); \\ \dfrac{d\psi_{rB}}{dt} = \alpha_r^{'} i_{sB} - \alpha_r\psi_{rB} + \dfrac{\omega}{\sqrt{3}}\left(\psi_{rB} - \psi_{rA}\right); \\ \dfrac{d\psi_{rC}}{dt} = \alpha_r^{'} i_{sC} - \alpha_r\psi_{rC} + \dfrac{\omega}{\sqrt{3}}\left(\psi_{rA} - \psi_{rB}\right); \\ M = \dfrac{k_r}{\sqrt{3}}\left[\psi_{rA}\left(i_{sB} - i_{sC}\right) - i_{sA}\left(\psi_{rB} - \psi_{rC}\right)\right]; \\ M - M_c = J_\Sigma\dfrac{d\omega}{dt} + \dfrac{\omega^2}{2}\cdot\dfrac{dJ_\Sigma}{d\varphi}; \quad \dfrac{d\varphi}{dt} = \omega, \end{cases} \quad (2)$$

где

$$\sigma = 1 - x_m^2/\left(x_s\cdot x_r\right), \alpha_r = r_r/x_r, k_r = x_m/x_r, \alpha^{'} = \alpha_r/\sigma$$

– электрические параметры двигателя; $\omega$, $\varphi$, – угловая скорость и угол поворота вала двигателя; $M$ – момент

двигателя; $Mc$, $J_\Sigma$ – приведённые к валу двигателя момент сопротивления и момент инерции механизма.

Точное кинематическое поведение наземной части привода насоса можно представить с помощью принципиальной схемы, показанной на рис. 3.

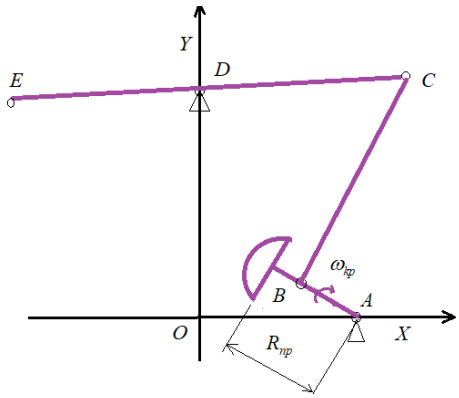



***Рис. 3.*** *Кинематическая схема привода штангового насоса*
***Fig. 3.*** *Kinematic scheme of sucker rod pump*

Пусть $AB=r$, $BC=k$, $CD=l_1$, $DE=l_2$, $OD=n_y$ и $OA=m_x$. В любой момент координат точек $A$, $B$, $C$, $D$ и $E$ можно описать формулой (3). Положение и скорость точки подвеса полированного штока определяется через координату $E$.

$$\left\{A(m_x,0);B(x_B,y_B);C(x_C,y_C);D(0,n_y);E(x_c,y_c)\right\}, \quad (3)$$

где

$$x_B = m_x + r\cdot\cos(\varphi_k);\ y_B = r\cdot\sin(\varphi_k);$$

$$x_c = \sqrt{l_1^2-(y_c-n_y)^2};\ y_c = \frac{-\beta\pm\sqrt{\beta^2-4\alpha\gamma}}{2\alpha};$$

$$x_E = -x_C\frac{l_2}{l_1}; y_E = n_y-(y_C-n_y)\frac{l_2}{l_1};$$

$$\alpha = 4((n_y-y_B)^2+x_B^2);\ \beta = 4(d(n_y-y_B)-2x_B^2n_y);$$

$$\gamma = d^2-(2x_Bl_1)^2+(2x_Bn_y)^2;$$

$$d = x_B^2-k^2+l_1^2-n_y^2+y_B^2;$$

$\varphi_k$ – угловое перемещение кривошипа.

Уравнение движения, описывающее динамику электропривода штангового насоса, нелинейно. Момент сопротивления нагрузки $M_c$ и момент инерции механизма $J_\Sigma$ являются функциями угла поворота кривошипа. Их описание приведено в (4) и (5) соответственно:

$$M_c = \sum_{i=1}^{i=q} M_{ci}u_i + \sum_{j=1}^{j=p} F_{cj}\rho_j; \quad (4)$$

$$J_\Sigma = \sum_{i=1}^{i=n} J_iu_i^2 + \sum_{j=1}^{j=k} m_j\rho_j^2, \quad (5)$$

где $M_{ci}$, $F_{cj}$ – момент сопротивления и сила, приложенные к $i$, $j$-му звену механической части электропривода; $J_i$, $m_j$ – момент инерции и масса $i$, $j$-го звена механической части электропривода; $u_i$, $\rho_j$ – передаточная функция и радиус приведения $i$, $j$-того звена.

Модель насоса

Плунжер, корпус-цилиндр, всасывающий и нагнетательный клапаны образуют собственно погружной насос. В цикле работы насоса последовательно происходит расширение газа при всасывании жидкости, сжатие газа и нагнетание жидкости. Состояние всасывающего клапана зависит от значения давления на приеме насоса относительно давления нагнетания. Точно так же состояние нагнетательного клапана зависит от значения давления нагнетания насоса относительно давления всасывания. Насос наполняется при открытии всасывающего клапана и опорожняется при открытии напорного клапана.

Во время работы некоторые газы выделяются из пластовой жидкости или растворяются в ней, всасываются или просачиваются в насос вместе с жидкостью. В результате масса и объем газа в насосе постоянно изменяются. Хотя давление насоса трудно измерить, но его значение или скорость изменения можно приблизительно оценить на каждой фазе. Во время фазы заполнения давление насоса принимается равным давлению всасывания, тогда как во время нагнетания жидкости давление насоса равно давлению нагнетания. Однако во время фазы сжатия и расширения изменение давления подчиняется правилам уравнения газового состояния. На основании правила нестационарного изменения давления жидкости в насосе [19] скорость изменения давления жидкости описывается формулой (6), когда плунжер движется вверх. Однако, если плунжер движется вниз, скорость изменения давления жидкости в насосе описывается (7). Нагрузка насоса ($F_p$) определяется по (8), это весьма важная компонента, поскольку она сильно влияет на величину нагрузки на полированный шток.

$$\frac{dp_{HAC}}{dt} = \begin{cases} \dfrac{\left[v_{pl}A_{pl}-\dfrac{\pi D_{pl}\delta^3}{12\mu L_p}\left(P_d-p_{HAC}\right)\right]P_d}{V_{og}(-1/n)\left(p_{HAC}/P_d\right)^{-\frac{1}{n}-1}}; & p_{HAC}>P_s; \\ 0; & p_{HAC}=P_s, \end{cases} \quad (6)$$

$$\frac{dp_{HAC}}{dt} = \begin{cases} \dfrac{\left[v_{pl}A_{pl}-\dfrac{\pi D_{pl}\delta^3}{12\mu L_p}\left(P_d-p_{HAC}\right)\right]P_s}{V_g(-1/n)\left(p_{HAC}/P_s\right)^{-\frac{1}{n}-1}}; & p_{HAC}>P_d; \\ 0; & p_{HAC}=P_d, \end{cases} \quad (7)$$

$$F_p(t) = A_{pl}\left(P_d-p_{HAC}(t)\right)-A_rP_d, \quad (8)$$

где $v_{pl}$ – скорость плунжера; $V_{og}$ – объем остаточного газа в цилиндре насоса; $V_g$ – объем свободного газа; $\delta$ – зазор между плунжером насоса и цилиндром; $\mu$ – кинематическая вязкость жидкости; $n$ – степенной коэффициент, $A_{pl}$ – площадь поперечного сечения плунжера, $A_r$ – площадь поперечного сечения штока, $P_d$ – давление нагнетания.

### Модель приточного коллектора

Приток жидкости в скважину описывается с использованием концепции закона Дарси [3]:

$$\frac{q}{A} = -\frac{k}{\mu}\frac{dp}{dl},$$

где $q$ – дебит жидкости; $A$ – площадь поперечного сечения; $\mu$ – вязкость жидкости; $k$ – эффективная проницаемость; $dp/dl$ – градиент давления.

### Материальный баланс в скважине

Состояние приточного коллектора связано с динамикой колонны насосных штанг через динамический уровень жидкости в скважине. Изменение динамического уровня влияет на материальный баланс в скважине. В периоды, когда нагнетательный клапан закрыт, динамический уровень увеличивается на величину, определяемую скоростью притока. С другой стороны, динамический уровень уменьшается на величину, определяемую скоростью притока и оттока. При расчете материального баланса учитываются физические свойства пластовой жидкости, такие как коэффициент объема пласта нефти, соотношение газойля в растворе, коэффициент изотермической сжимаемости, вязкость нефти и т. д., которые описаны в [20].

### Имитационные исследования

Компьютерные методы диагностики требуют большого количества обучающих данных, которые описывают различные рабочие состояния контролируемого оборудования [9]. Однако в течение срока службы скважины возникает лишь несколько возможных рабочих состояний. Более того, образцы от разных скважин не всегда имеют одинаковое распределение, поэтому их прямое использование в качестве обучающих данных вряд ли может дать хорошие результаты. Динамический симулятор штангового насоса позволяет формировать обучающий набор, отражающий различные неисправные рабочие состояния. Чаще всего отказы в работе ШГНУ возникают из-за неисправностей в подземной части. Изменяя параметры в модели коллектора, свойства жидкости или предполагая механические проблемы, можно смоделировать различные возможные сценарии работы ШГНУ. На рис. 4 показаны ваттдиаграммы двигателя, рассчитанные симулятором ШГНУ (рис. 2) для ряда характерных случаев: нормального рабочего состояния; при утечке всасывающего клапана; воздействии газа; недостаточной подачи жидкости; состояниях, когда плунжер ударяет в корпус насоса в верхней (высокая посадка плунжера) или нижней (низкая посадка плунжера) мертвой точке.

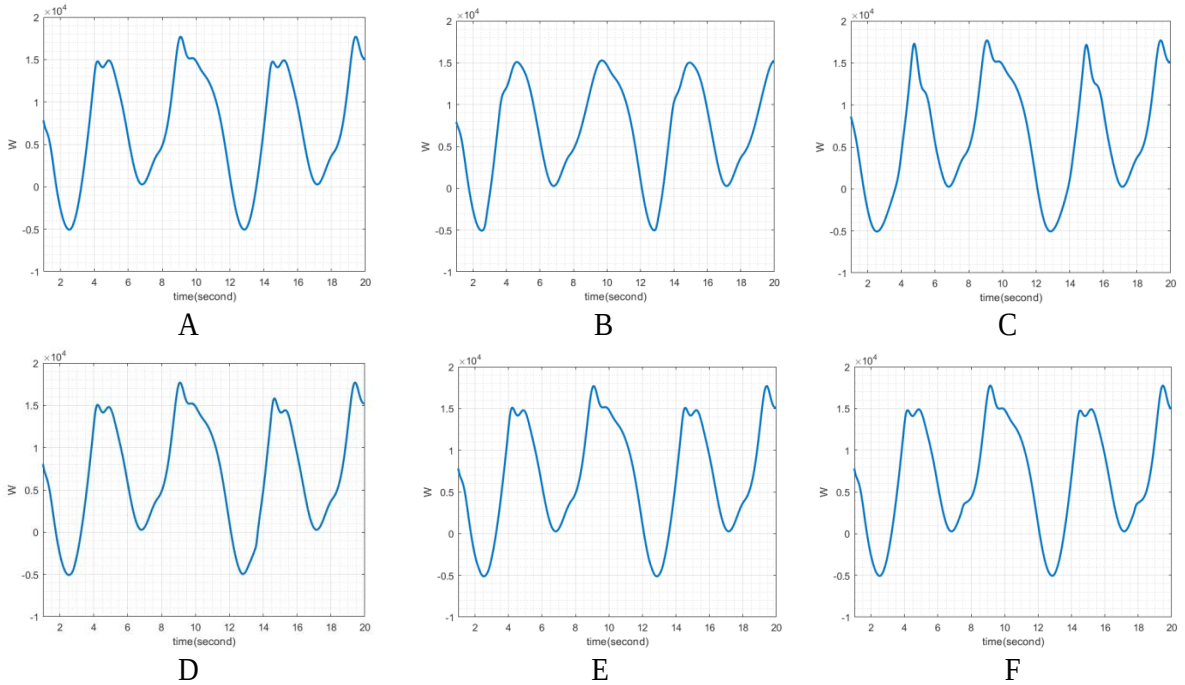



***Рис. 4.*** *Диаграммы мощности двигателя: A) нормальное рабочее состояние; B) утечка в приемном клапане; C) влияние газа; D) незаполнение насоса; E) высокая посадка плунжера; F) низкая посадка плунжера*

***Fig. 4.*** *Motor power curves: A) normal working state; B) travelling valve leakage; C) gas effect; D) insufficient liquid supply; E) plunger hit top dead center; F) plunger hit bottom dead center*

Очевидно, форма диаграммы мощности двигателя изменяется в ответ на эффект, вызванный соответствующей проблемой. Однако дать оценку текущему рабочему состоянию штангового насоса при визуальном контроле ваттдиаграммы непросто. В таком случае предлагается использовать компьютерные методы распознавания образов. Для компьютерных методов любая выборка должна быть представлена вектором признаков. Вектор признаков должен содержать только полезную информацию и однозначно характеризовать образец. Полезная информация о работе штангового насоса на диаграмме мощности двигателя лучше всего характеризуется значениями мощности в момент переключения клапанов. В данном исследо-

вании для построения вектора признаков вычисляются следующие значения:

- расстояние между точками переключения клапанов $L_a$, $L_b$, $L_c$, как показано на рис. 5;
- относительный рабочий коэффициент четырех частей цикла ($w_1$, $w_2$, $w_3$, $w_4$);

$$w_1 = \frac{1}{W}\int_{t_o}^{t_1} P(t)\cdot dt;\quad w_2 = \frac{1}{W}\int_{t_1}^{t_2} P(t)\cdot dt;$$

$$w_3 = \frac{1}{W}\int_{t_2}^{t_3} P(t)\cdot dt;\quad w_4 = \frac{1}{W}\int_{t_3}^{t_4} P(t)\cdot dt;$$

$$W = \int_{t_0}^{t_4} P(t)\cdot dt,$$

где $t_o$–$t_1$ – длительность первой части хода вниз; $t_1$–$t_2$ – вторая часть хода вниз; $t_2$–$t_3$ – первая часть хода вверх; $t_3$–$t_4$ – вторая часть хода вверх; $t_0$–$t_4$ – продолжительность цикла.

- относительное значение разницы между двумя пиками ($D$);

$$D = \frac{\delta_1 - \delta_2}{\max(\delta_1, \delta_2)},$$

где $\delta_1$ – максимальная мощность во время хода вниз, а $\delta_2$ – максимальное значение мощности во время хода вверх;

- отношение отрицательной энергии в цикле к положительной ($R_{NP}$);
- энергия дисбаланса механизма при движении штока вверх и вниз ($w_{un}$).

$$w_{un} = w_1 + w_2 - w_3 - w_4.$$

Средние значения вектора признаков, вычисленные для данных образцов при вариации состояний, показаны в таблице. Оценивая их, можно сказать, что полученные значения однозначно характеризуют каждое рабочее состояние насоса и могут быть использованы для обучения системы диагностики.

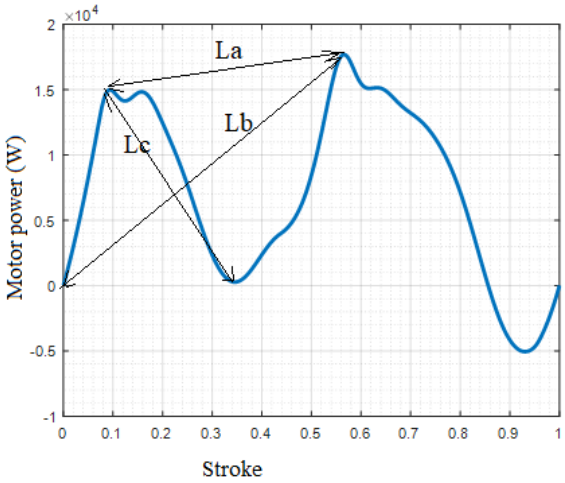



***Рис. 5.*** *Образец диаграммы мощности двигателя*
***Fig. 5.*** *Sample of motor power curve*

***Таблица.*** *Средние значения вектора признаков для данных образцов*
***Table.*** *Average value for the given samples*

| State | $L_a$ | $L_b$ | $L_c$ | D | $R_{NP}$ | $w_1$ | $w_2$ | $w_3$ | $w_4$ | $w_{un}$ |
|---|---|---|---|---|---|---|---|---|---|---|
| N | 0,4251 | 0,7967 | 0,4529 | –0,1417 | 0,0823 | 0,2018 | 0,1839 | 0,3971 | 0,2172 | 0,2286 |
| TVL | 0,4774 | 0,7297 | 0,4624 | –0,0443 | 0,0716 | 0,2409 | 0,1873 | 0,3546 | 0,2172 | 0,1435 |
| GA | 0,4162 | 0,7985 | 0,5027 | –0,0270 | 0,1177 | 0,1017 | 0,2036 | 0,4476 | 0,2470 | 0,3893 |
| ILS | 0,3983 | 0,7930 | 0,4502 | –0,1133 | 0,1056 | 0,0540 | 0,2027 | 0,4862 | 0,2572 | 0,4867 |
| PHT | 0,4417 | 0,7105 | 0,4374 | –0,1204 | 0,1054 | 0,1854 | 0,1835 | 0,4091 | 0,2220 | 0,2622 |
| PHB | 0,4364 | 0,7017 | 0,4340 | –0,1289 | 0,0992 | 0,2035 | 0,1867 | 0,3880 | 0,2218 | 0,2195 |

*N – нормальная работа; TVL – утечка приемного клапана; GA – влияние газа; ILS – незаполнение насоса; PHT – высокая посадка плунжера; PHB – низкая посадка плунжера.*

*N – normal; TVL – travelling valve leakage; GA– gas effect; ILS – insufficient liquid supply; PHT – condition when plunger hits top dead center; PHB – condition when plunger hits bottom dead center.*

SVM является машиной принятия решений и не требует апостериорных вероятностей [21]. Поэтому его удобство в использовании данных, сгенерированных моделью [22], очевидно. В предлагаемом исследовании классификатор SVM, созданный обучением на 72 образцах на основе алгоритма SVM, правильно классифицировал по 12 тестовых образцов нормального рабочего состояния ШГНУ, влияние газа и утечку приемного клапана. Однако из 12 тестовых образцов незаполнения насоса 2 образца были классифицированы как нормальная работа, а 3 образца – как влияние газа.

### Заключение

Мониторинг и диагностика штанговых глубинных насосных установок является важной задачей обеспечения их эффективной работы. Информация о рабочем состоянии штангового насоса отражается в динамограмме механизма и ваттдиаграмме приводного двигателя. Анализ вида ваттдиаграммы позволяет оценить рабочее состояние штангового насоса, но определить его визуально довольно затруднительно. Кроме того, ручная диагностика неисправностей утомительна и трудоемка. Автоматическая диагностика неисправностей, основанная на методах машинного обучения, представляет особый интерес для разработчиков систем мониторинга. Однако методы машинного обучения требуют большого количества обучающих выборок для обеспечения достаточной точности диагностики. При этом диаграмму мощности двигателя необходимо соотносить с динамограммой, чтобы получить маркированный образец. Таким образом, потребность в большом количестве маркированных образцов для обучения систем диагностики оборудования – это новый вызов для исследователей. Для удовлетворения требований к обучению предлагается динамический

симулятор электропривода штанговой глубинной насосной установки [23]. Рассмотренный симулятор позволяет генерировать ваттдиаграммы электропривода для различных типов неисправностей насоса, которые могут быть использованы для обучения систем автоматической диагностики.

### СПИСОК ЛИТЕРАТУРЫ

1. Tripp H. A review: analyzing beam-pumped wells // Journal of Petroleum Technology. – 1989. – V. 4. – № 5. – P. 457–458.
2. Boyuan Zheng, Xianwen Gao Diagnosis of sucker rod pumping based on dynamometer card decomposition and hidden Markov model // Transactions of the Institute of Measurement and Control. – 2018. – V. 40. – № 16. – P. 4309–4320.
3. Takács Gábor. Sucker rod pumping handbook. – Waltham: Gulf Professional Publishing, 2015. – 585 p.
4. Ao Zhang, Xianwen Gao. Fault diagnosis of sucker rod pumping systems based on curvelet transform and sparse multi-graph regularized extreme learning machine // International Journal of Computational Intelligence Systems. – 2018. – V. 11. – № 1. – P. 428–437.
5. Boyuan Zheng, Xianwen Gao, Xiangyu Li. Diagnosis of sucker rod pump based on generating dynamometer cards // Journal of Process Control. – 2019. – V. 77. – P. 76–88.
6. Using the curve moment and the PSO-SVM method to diagnose downhole conditions of a sucker rod pumping unit / Kun Li, Xianwen Gao, Zhongda Tian, Zhixue Qiu // Petroleum Science. – 2013. – V. 10. – № 1. – P. 73–80.
7. Multiple fault diagnosis of down-hole conditions of sucker-rod pumping wells based on Freeman chain code and DCA / Kun Li, Xian-wen Gao, Weibing Yang, Yinglong Dai, Zhongda Tian // Petroleum Science. – 2013. – V. 10. – № 3. – P. 347–360.
8. Boyuan Zheng, Xian-wen Gao, Xiangyu Li. Fault detection for sucker rod pump based on motor power // Control Engineering Practice. – 2019. – V. 86. – P. 37–47.
9. Zheng B., Gao X., Pan R. Sucker rod pump working state diagnosis using motor data and hidden conditional random fields // IEEE Transactions on Industrial Electronics. – 2020. – V. 67. – № 9. – P. 7919–7928.
10. Зюзев А.М., Бубнов М.В. Диагностика уравновешенности штанговой глубинной насосной установки по ваттметрограмме // Известия Томского политехнического университета. Инжиниринг георесурсов. – 2019. – Т. 330. – № 4. – С. 178–187.
11. Weicheng Li, Shimin Dong, Xiurong Sun. An improved sucker rod pumping system model and swabbing parameters optimized design // Mathematical Problems in Engineering. – 2018. – V. 2018. – P. 1–15.
12. Зюзев А.М. Математические модели механической части электроприводов. – Екатеринбург: УрФУ, 2010. – 154 с.
13. Takács G. Sucker-rod pumping manual. – Tulsa, Oklahoma: PennWell Books, 2003. – 359 p.
14. Выбор критериев уравновешивания штанговых скважинных насосных установок / Г.И. Бикбулатова, Г.И. Болтнева, А.С. Галеев, Р.Н. Сулейманов, С.Л. Сабанов // Газовая промышленность. – 2019. – № 11 (792). – С. 124–128.
15. Identification of working condition from sucker-rod pumping wells based on multi-view co-training and Hessian regularization of SVM / B. Zhou, Y. Wang, W. Liu, B. Liu // 2018 14th IEEE International Conference on Signal Processing (ICSP). – Beijing, China, 2018. – P. 969–973.
16. Everitt T., Jennings J.W. An improved finite-difference calculation of downhole dynamometer cards for sucker-rod pumps // SPE Production Engineering. – 1992. – V. 7. – P. 121–127.
17. Lv W.J., Xing M. Characteristic analysis of longitudinal vibration sucker rod string with variable equivalent stiffness // MATEC Web Conf. – Kuala Lumpur, Malaysia, 2018. – V. 153. – P. 1–5.
18. Фираго Б.И., Павлячик Л.Б. Регулируемые электроприводы переменного тока. – Мн.: Техноперспектива, 2006. 363 с.
19. Xing M. Response analysis of longitudinal vibration of sucker rod string considering rod buckling // Advances in Engineering Software. – 2016. – V. 99. – P. 49–58.
20. McCain Jr. W.D. The properties of petroleum fluids. – Tusla, Oklahoma: PennWell Publishing Company, 1990. – 548 p.
21. Bishop Ch.M. Pattern recognition and machine learning. – New York: Springer, 2006. – 738 p.
22. Semenov A.V., Tecle S.I., Ziuzev A. Modeling induction motor driven sucker rod pump in MATLAB simscape // 2020 Russian Workshop on Power Engineering and Automation of Metallurgy Industry: Research and Practice (PEAMI). – Magnitogorsk, Russia, 2020. – P. 67–71.
23. Семенов А.В., Зюзев А.М., Текле С.И. Симулятор штанговой глубинно насосной установки: свидетельство о государственной регистрации программы для ЭВМ № 2020666580, 11.12.2020, заявка № 2020665912, 4 дек 2020. Федеральный институт промышленной собственности.

*Поступила 13.01.2022 г.*

### Информация об авторах

***Зюзев А.М.***, доктор технических наук, профессор кафедры электропривода и автоматизации промышленных установок Уральского федерального университета.

***Самуэль Исаак Текле***, аспирант кафедры электропривода и автоматизации промышленных установок Уральского федерального университета.

UDC 622.276.53

# SUCKER ROD PUMPING SYSTEM: CHALLENGES TO DEVELOP DIAGNOSTIC SYSTEM AND ROLE OF DYNAMIC SIMULATOR

**Anatolii M. Ziuzev**[1],
a.m.zyuzev@urfu.ru

**Samuel Isaac Tecle**[1],
samuel47tecle@gmail.com

[1] Ural Federal University,
19, Mira street, Yekaterinburg, 620002, Russia.

***Relevance.*** *Production benefits and efficiency of sucker rod pump installations is highly dependent on the accuracy of monitoring and fault diagnosis system used. When sucker rod pump is operated at faulty working states, the rate of equipment failure increases and the production efficiency decreases. Moreover, since the sucker rod pump operates deep in the underground, maintenance cost is more, and production is interrupted for longer time. Hence, improving monitoring and diagnostic system for sucker rod pump operation has become very important. The information about sucker rod pump working state is embodied in the dynamometer card and motor power curve. Monitoring sucker rod pump using motor power curve is more advantageous than dynamometer card. It can be used to monitor both surface and subsurface equipment. Moreover, motor power curve is obtained using more reliable current and voltage measurements. Therefore, the motor power curve provides a better alternative evidence for development of monitoring and diagnostic systems for sucker rod pumps.*

***The main aim*** *of the research is to ease the challenges those impede the promotion of diagnostic models using motor power curve.*

***Objects:*** *electrical drive, sucker rod pumping unit, oil producing well.*

***Methods:*** *sucker rod pump simulation model; feature extraction method that produces a feature vector to uniquely represent each working state; diagnostic method based on support vector machine.*

***Results.*** *72 labeled motor power curves representing six working states namely: normal working state, travelling valve leakage, gas affected, insufficient liquid supply, condition when the plunger hits top dead center and bottom dead center, are generated. It was seen that the feature vector constructed based on the valve working points and energy consumption represent uniquely each working state. It was also seen that the support vector machine classifier correctly classifies the samples for normal, travelling valve leakage, gas affected working states. However, some samples of insufficient liquid supply were misclassified as gas affected and normal.*

***Key word:***
*Sucker rod pump, feature extraction, dynamometer card, fault diagnosis.*

## REFERENCE

1. Tripp H. A review: analyzing beam-pumped wells. *Journal of Petroleum Technology*, 1989, vol. 41, no. 5, pp. 457–458.
2. Boyuan Zheng, Xianwen Gao. Diagnosis of sucker rod pumping based on dynamometer card decomposition and hidden Markov model. *Transactions of the Institute of Measurement and Control*, 2018, vol. 40, no. 16, pp. 4309–4320.
3. Takács Gábor. *Sucker rod pumping handbook*. Waltham, Gulf Professional Publishing, 2015. 585 p.
4. Ao Zhang, Xianwen Gao. Fault diagnosis of sucker rod pumping systems based on curvelet transform and sparse multi-graph regularized extreme learning machine. *International Journal of Computational Intelligence Systems*, 2018, vol. 11, no. 1, pp. 428–437.
5. Boyuan Zheng, Xianwen Gao, Xiangyu Li. Diagnosis of sucker rod pump based on generating dynamometer cards. *Journal of Process Control*, 2019, vol. 77, pp. 76–88.
6. Kun Li, Xianwen Gao, Zhongda Tian, Zhixue Qiu. Using the curve moment and the PSO-SVM method to diagnose downhole conditions of a sucker rod pumping unit. *Petroleum Science*, 2013, vol. 10, no. 1, pp. 73–80.
7. Kun Li, Xianwen Gao, Weibing Yang, Yinglong Dai, Zhongda Tian. Multiple fault diagnosis of down-hole conditions of sucker-rod pumping wells based on Freeman chain code and DCA. *Petroleum Science*, 2013, vol. 10, no. 3, pp. 347–360.
8. Boyuan Zheng, Xianwen Gao, Xiangyu Li. Fault detection for sucker rod pump based on motor power. *Control Engineering Practice*, 2019, vol. 86, pp. 37–47.
9. Zheng B., Gao X., Pan R. Sucker rod pump working state diagnosis using motor data and hidden conditional random fields. *IEEE Transactions on Industrial Electronics*, 2020, vol. 67, no. 9, pp. 7919–7928.
10. Zyuzev A.M., Bubnov M.V. Diagnostics of the balance of the rod deep pumping unit according to the wattmetrogram. *Bulletin of the Tomsk Polytechnic University. Geo Assets Engineering*, 2019, vol. 330, no. 4, pp. 178–187. In Rus.
11. Weicheng Li, Shimin Dong, Xiurong Sun. An improved sucker rod pumping system model and swabbing parameters optimized design. *Mathematical Problems in Engineering*, 2018, vol. 2018, pp. 1–15.
12. Ziuzev A.M. *Matematicheskie modeli mekhanicheskoy chasti elektroprivodov* [Mathematical models of the mechanical part of electric drives]. Ekaterinburg, URFU Publ., 2010. 154 p.
13. Takács G. *Sucker-rod pumping manual*. Tulsa, Oklahoma, PennWell Books, 2003. 359 p.
14. Bikbulatova G.I., Boltneva G.I., Galeev A.S., Suleymanov R.N., Sabanov S.L. Selection of the balance criterion for rod borehole pumping units. *Gas industry*, 2019, no. 11 (792), pp. 124–128.
15. Zhou B., Wang Y., Liu W., Liu B. Identification of working condition from sucker-rod pumping wells based on multi-view co-training and Hessian regularization of SVM. *2018 14th IEEE International Conference on Signal Processing (ICSP)*. Beijing, China, 2018. pp. 969–973.
16. Everitt T., Jennings J.W. An improved finite-difference calculation of downhole dynamometer cards for sucker-rod pumps. *SPE Production Engineering*, 1992, vol. 7, pp. 121–127.
17. Lv W.J., Xing M. Characteristic analysis of longitudinal vibration sucker rod string with variable equivalent stiffness. *MATEC Web Conf.* – Kuala Lumpur, 2018, vol. 153, pp. 1–5.
18. Firago B.I., Pavlyachik L.B. *Reguliruemye elektroprivody peremennogo toka* [Adjustable AC electric drives]. Minsk, Tekhnoperspektiva Publ., 2006. 363 p.
19. Xing M. Response analysis of longitudinal vibration of sucker rod string considering rod buckling. *Advances in Engineering Software*, 2016, vol. 99, pp. 49–58.
20. McCain Jr. W.D. *The properties of petroleum fluids*. Tusla, Oklahoma, PennWell Publishing Company, 1990. 548 p.

21. Bishop Ch.M. *Pattern recognition and machine learning*. New York, Springer, 2006. 738 p.
22. Semenov A.V., Tecle S.I., Ziuzev A. Modeling induction motor driven sucker rod pump in MATLAB simscape. *2020 Russian Workshop on Power Engineering and Automation of Metallurgy Industry: Research and Practice (PEAMI)*. Magnitogorsk, Russia, 2020. pp. 67–71.
23. Semenov A.V., Ziuzev A., Tecle S.I. *Simulyator shtangovoy glubinno nasosnoy ustanovki: svidetelstvo o gosudarstvennoy registratszii programmy dlya EVM* [Sucker rod pumping unit simulator: certificate of state registration of a computer program]. RF, no. 2020666580, 2020.

*Received: 13 January 2022.*

**Information about the authors**

***Anatolii M. Ziuzev***, Dr. Sc., professor of Ural Federal University.
***Samuel Isaac Tecle***, post graduate student, Ural Federal University.

УДК 621.432.3; 621.438.081; 621.438.082

# ОЦЕНКА ЭФФЕКТИВНОСТИ ИСПОЛЬЗОВАНИЯ ПАРОГАЗОВЫХ ПРОДУКТОВ ПИРОЛИЗА ДРЕВЕСНЫХ ОТХОДОВ В КАЧЕСТВЕ РАБОЧЕГО ТЕЛА В ГАЗОТУРБИННЫХ УСТАНОВКАХ И ДВИГАТЕЛЯХ ВНУТРЕННЕГО СГОРАНИЯ

**Цибульский Святослав Анатольевич**[1],
stzibulsky@tpu.ru

**Ларионов Кирилл Борисович**[1],
laryk070@gmail.com

**Слюсарский Константин Витальевич**[1],
slyuskonst@gmail.com

**Галашов Николай Никитович**[1],
gal@tpu.ru

**Гаспарян Гарик Давидович**[2],
garik.gasparian@yandex.ru

**Улько Александр Анатольевич**[2],
ulkoalexandr@gmail.ru

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

[2] ООО «Сибирский Биоуголь»,
Россия, 248000, г. Калуга, ул. Воскресенская, 33.

***Актуальность*** *темы обусловлена возможностью использования такого вида топлива, как парогазовые продукты пиролиза древесных отходов, в качестве основного или вспомогательного топлива для выработки электрической энергии. Направления, связанные со снижением углеродных выбросов, позволят расширить области применения пиролиза как средства переработки промышленных отходов, сводя к минимуму их воздействие на окружающую среду.*
***Цель:*** *исследование вопросов повышения эффективности выработки электрической энергии на двигателях внутреннего сгорания и газотурбинных установках при работе на продуктах пиролиза древесных отходов с целью сокращения потребления невозобновляемых энергоресурсов, таких как уголь, нефть и природный газ.*
***Объекты:*** *установка пиролиза древесных отходов, двигатели внутреннего сгорания и газотурбинные установки, работающие на парогазовых продуктах пиролиза древесных отходов.*
***Методы:*** *численные методы исследования на основе математического моделирования систем и элементов двигателей внутреннего сгорания и газотурбинных установок на основе материальных и энергетических балансов.*
***Результаты.*** *Разработана математическая модель и программа для теплового расчета двигателей внутреннего сгорания и газотурбинных установок, сжигающих парогазовые продукты пиролиза. Проведен параметрический анализ влияния температуры выхода парогазовых продуктов из пиролизной установки на эффективность работы, электрическую мощность и температуру уходящих газов рассмотренных силовых агрегатов. Установлено, что для утилизации парогазовых продуктов пиролиза с целью получения электрической энергии наиболее эффективно применение двигателя внутреннего сгорания, работающего по термодинамическому циклу Тринклера, и газотурбинной установки, работающей по термодинамическому циклу Брайтона, при этом абсолютный электрический коэффициент полезного действия в номинальном режиме работы пиролизной установки составляет 23,34 и 22,28 % соответственно. Выявлено, что при использовании парогазовых продуктов пиролиза в качестве вспомогательного топлива к метану в объемной составляющей 25 %, снижение мощности силового агрегата ожидается не более 10 %.*

***Ключевые слова:***
*Пиролиз, парогазовые продукты, термодинамический цикл, двигатель внутреннего сгорания, газотурбинная установка, математическая модель.*

## Введение

В настоящее время одним из потенциальных решений, связанных со снижением углеродного следа энергетических и металлургических предприятий, является использование углерод-нейтрального топлива в виде древесного угля – полукокса [1, 2]. Это связано с тем, что образующийся при сжигании данного вида топлива $CO_2$ был в обозримом прошлом поглощен из атмосферы, делая данные топлива т. н. углерод-нейтральными [3].

Одним из современных способов получения полукокса является технология медленного пиролиза биомассы, преобразование которой протекает в бескислородной среде при температуре 400–600 °C со скоростью нагрева 5–80 °C в минуту [4–6]. Основным продуктом медленного пиролиза является полукокс, характеризующийся низким содержанием золы, отсутствием серы и теплотой сгорания $Q^r_i$=28–33 МДж/кг [4] в зависимости от технологических параметров про-



DOI 10.18799/24131830/2022/1/3446

цесса и используемого сырья [5]. Вторичными продуктами являются биомасло и неконденсируемый газ, которые могут быть использованы в качестве вторичных энергоносителей для частичной компенсации энергозатрат непосредственно процесса пиролиза.

Биомасло, несмотря на высокий энергетический потенциал ($Q^r_i$=15–25 МДж/кг) [7], имеет ряд технологических особенностей, осложняющих его использование в энергетической отрасли [7]. Прежде всего, это связано с низким значением pH (2–3) [8], неоднородным физико-химическим составом [7] и высоким содержанием воды (15–30 %) [7]. Повышенное содержание воды вызвано сложностью выбора правильного технологического режима конденсации парогазовой смеси и природой используемого сырья (биомассы), в частности наличия в ней связной влаги [9]. Это негативно отражается на его теплоте сгорания, сложности воспламенения, снижении температуры горения и может привести к преждевременному испарению и, как следствие, затруднению распыла масла в форсуночных устройствах топливной системы [10]. Таким образом, наличие представленных выше негативных технологических факторов снижает рыночный интерес к энергоносителям данного вида, делая его менее востребованным по сравнению с производимым полукоксом.

Наиболее удобным и эффективным способом подвода тепла к сырью является электрический нагрев ввиду аллотермического режима работы большинства пиролизных установок [11]. Нагрев с помощью ТЭНов позволяет обеспечить оперативное изменение режима работы пиролизной установки (регулирование скорости нагрева и температуры греющей среды) и технических характеристик получаемых продуктов.

Таким образом, одним из решений для использования вторичных энергоносителей является их сжигание в камерах сгорания газотурбинных установок (ГТУ) или двигателях внутреннего сгорания (ДВС) в виде парогазовой смеси для выработки электрической энергии. Это позволит частично компенсировать энергозатраты на работу пиролизной установки и ее вспомогательных систем и дополнительно снизить или даже исключить накопление биомасла в случае отсутствия рыночного интереса к настоящему продукту.

Большинство существующих работ в области генерации электрической энергии посредством применения продуктов пиролизных технологий связаны с использованием жидких углеводородов, полученных в процессе переработки различных видов отходов (пластики, изношенные шины, биомасса) [12–15]. Таким образом, рабочим телом в ГТУ и ДВС являются парогазовые продукты пиролиза (ППП) жидких углеводородов.

В работах [16, 17] представлены результаты исследования использования пиролизных масел, полученных из пластиковых отходов и автомобильных шин, в качестве замены дизельному топливу в ДВС. Авторами рассмотрены вопросы впрыска парогазовых продуктов пиролиза с помощью форсунок высокого давления без существенных изменений их конструкции и характеристик горения в камере сгорания.

В настоящей работе приведены результаты численной оценки эффективности работы различных циклов ГТУ и ДВС при использовании парогазовых продуктов пиролиза древесных отходов в качестве основного или вспомогательного энергоносителя.

### Установка пиролиза древесных отходов

Состав парогазовых продуктов пиролиза и материальный баланс получаемых продуктов пиролиза были определены по результатам опытных измерений, выполненных на установке медленного пиролиза древесных брикетов, размещенной на производственной площадке компании ООО «Сибирский Биоуголь» (п. Беляй, Томская область, Россия). На рис. 1 представлена принципиальная схема работы установки пиролиза древесных отходов непрерывного действия с получением брикетированного полукокса.

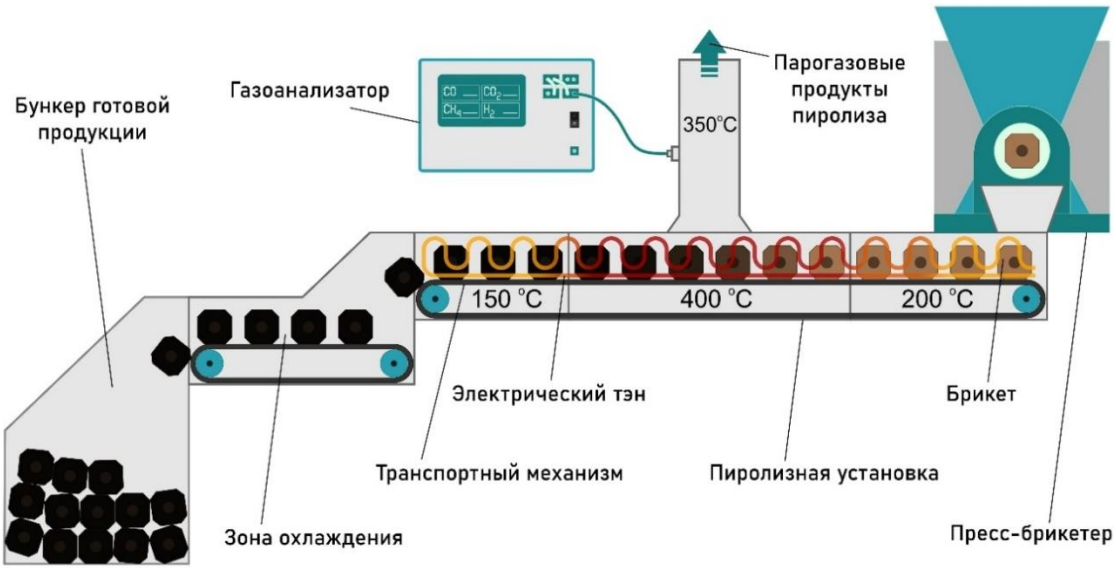



***Рис. 1.*** *Принципиальная схема установки пиролиза*
***Fig. 1.*** *Basic diagram of pyrolysis installation*

Принцип работы установки заключается в проведении стадийного процесса пиролиза древесных брикетов с последовательным нагревом/охлаждением продуктов. Перед попаданием в пиролизную установку древесные отходы (сосновые опилки с рабочей влажностью около 10 мас. %) брикетируются с помощью термического пресса при температуре 230±10 °С. Далее брикеты поступают на металлизированную конвейерную ленту и транспортируются в первую часть камеры пиролизной установки, где подвергаются нагреву до температуры 200±20 °С. Затем следует стадия нагрева до температуры 400±20 °С. Самая продолжительная стадия пиролизного процесса протекает при температуре 400 °С. Завершающие стадии процесса связаны с охлаждением образующегося полукокса. Производительность пиролизной установки составляет 500 кг/ч (по исходному сырью). Подвод тепла к сырью осуществляется косвенным способом с помощью электрических нагревателей.

***Таблица.*** *Характеристики сырья и получаемых продуктов пиролиза*

***Table.*** *Characteristic of raw materials and obtained pyrolysis products*

| Параметр<br>Argument | Значение<br>Value |
|---|---|
| Технический состав, мас. %<br>Technical composition, wt. % | |
| Влажность $W^r$<br>Humidity $W^r$ | 9,8 |
| Зольность $A^d$<br>Ash content $A^d$ | 1,2 |
| Выход летучих веществ $V^{daf}$<br>Volatile content $V^{daf}$ | 80,2 |
| Элементный состав$^d$, мас. %<br>Elementary composition$^d$, wt. % | |
| C | 48,9 |
| H | 5,9 |
| N | 0,1 |
| S | – |
| O | 43,9 |
| Материальный баланс, мас. %<br>Material balance, wt. % | |
| Полукокс<br>Semi-coke | 30,0 |
| Парогазовая смесь<br>Gas-vapor mixture | 70,0 |
| Состав парогазовых продуктов пиролиза, об. %<br>Composition of pyrolysis vapor, vol. % | |
| CO | 32,3 |
| $CO_2$ | 30,4 |
| $CH_4$ | 20,3 |
| $H_2$ | 4,4 |
| Плотность*, кг/м$^3$<br>Density*, kg/m$^3$ | 0,47 |
| Низшая теплота сгорания*, МДж/нм$^3$<br>Net calorific value*, MJ/nm$^3$ | 9,01 |

*$^r$ – рабочее состояние, $^d$ – сухое состояние, $^{daf}$ – сухое беззольное состояние, * – плотность парогазовой смеси при температуре 350 °С.*

*$^r$ – working condition, $^d$ – dry condition, $^{daf}$ – dry ash free, * – density of the vapor-gas mixture at 350 °C.*

Как видно из рис. 1, извлечение образующихся парогазовых продуктов пиролиза осуществляется на стадии активного пиролиза посредством встроенного патрубка и тягодутьевого насоса. Определение количественного состава газофазных продуктов (CO, $CO_2$, $CH_4$, $H_2$) осуществлялось с помощью поточного газоанализатора Тест-1 (БОНЭР, Россия), пробоотборник которого был встроен в выхлопной патрубок пиролизной установки.

В таблице приведены результаты определения технических характеристик исходного сырья, материальный баланс получаемых продуктов и состав парогазовой смеси. Технические характеристики сырья (влажность, зольность, содержание летучих веществ) были определены с использованием стандартных методик ISO: ISO 589: 2008 «Каменный уголь – Определение общей влажности», ISO 1171: 2010 «Твердое минеральное топливо – Определение золы» и ISO 562: 2010 «Каменный уголь и кокс – Определение летучих веществ». Элементный состав был определен с помощью анализатора Flash 2000 CHNS (Thermo Fisher Scientific, США).

По данным таблицы количество образующихся парогазовых продуктов в процессе пиролиза древесных отходов (при расходе исходного вещества 0,5 т/ч) составляет 740,55 м$^3$/ч. Таким образом, количество располагаемого тепла $Q^P_Г$, которое можно получить в результате сжигания парогазовой смеси, составляет около 1490 МДж/ч при температуре на выходе из установки 350 °С.

### Циклы двигателей внутреннего сгорания и газотурбинных установок

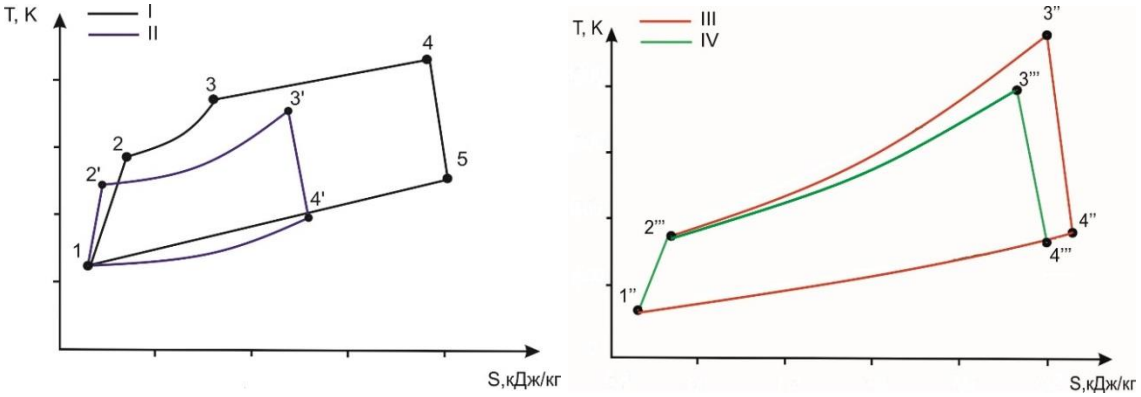
Для снижения операционных издержек на производство продукции в данной работе предлагается использовать возможность утилизации энергии, которая содержится в парогазовых продуктах пиролиза, выходящих из установки (рис. 1). Так как на нагрев ТЭНов для получения готовой продукции расходуется электрическая энергия, данный вид энергоносителя можно направить на работу установки, с помощью которой будет генерироваться электрическая энергия для компенсации собственных нужд.

В данной работе предложена следующая схема утилизации располагаемого тепла парогазовых продуктов пиролиза. Газы из пиролизной установки направляются в силовой агрегат, в котором в результате последовательных процессов сжатия, воспламенения, горения и расширения совершается работа на валу. Двигатель через муфту соединен с генератором, который вырабатывает электрическую энергию.

Для исследования эффективности работы силового агрегата в составе пиролизной установки при различных начальных температурах и составе газа были рассмотрены 4 термодинамических цикла: 2 цикла для ДВС (Тринклера, Отто) и 2 цикла для ГТУ (Гемфри, Брайтона). Данный выбор был обусловлен способностью силовых агрегатов данных типов к стабильной и надежной работе на исходном составе парогазовых продуктов пиролиза в широком диапазоне начальных температур (таблица).

На рис. 2, *а* в TS-координатах приведены процессы, протекающие в ДВС, работающих по циклам Тринклера, Отто, на рис. 2, *б* – процессы в ГТУ – Брайтона, Гемфри. Процессы, протекающие в ДВС,

построены в TS-координатах для температуры парогазовых продуктов пиролиза перед установкой $T_{ВХ}$=350 °С. При этом на рис. 2, *б* циклы ГТУ построены с процессом сжатия воздуха в воздушном компрессоре ($1–2^{///}$), температура в точке $1^{//}$ составляет 15 °С.




*а/a* *б/b*

***Рис. 2.*** *Термодинамические циклы в TS-диаграмме: а) циклы двигателей внутреннего сгорания, б) циклы газотурбинных установок: I – Тринклера, II – Отто, III – Брайтона, IV – Гемфри*

***Fig. 2.*** *Thermodynamic cycles in the TS-diagram: a) cycle of internal combustion engine, b) cycle of gas turbine unit: I – Trinkler, II – Otto, III – Braithon, IV – Gemphri*

Двигатель внутреннего сгорания Тринклера работает следующим образом. Воздух при температуре 15 °С подается через впускной клапан в цилиндр путем разрежения, создаваемого поршнем. Графически термодинамический цикл Тринклера изображен на рис. 2, *а* (цикл I: 1–2–3–4–5). В адиабатном процессе 1–2 в цилиндре повышается давление и при помощи форсунок впрыскивается ППП. В результате высокого давления и температуры в точке 2 топливо самовоспламеняется в окислительной среде воздуха. В момент возгорания топлива поршень находится в верхней мертвой точке (ВМТ) 2. В процессе сжигания топлива 2–3 температура повышается, продукты сгорания расширяются и толкают поршень до пересечения с осью вала. Далее продукты сгорания топлива продолжают охлаждаться и расширяться в процессе 3–4, поршень движется до нижней мертвой точки (НМТ). За счет того, что на коленчатом валу установлено несколько поршней, которые приводят его в движение, в определенный момент времени, поршень движется вверх по цилиндру в процессе 4–5, при этом открывается выпускной клапан, выхлопные газы удаляются в процессе 5–1, и цикл начинается вновь.

Цикл Тринклера представляет собой модернизированный цикл Дизеля. За счет комбинированного способа подвода тепла для двигателей, работающих по данному термодинамическому циклу, они характеризуются высоким КПД и мощностью при относительно небольшом расходе топлива. В настоящее время цикл Тринклера для ДВС вытесняет традиционные циклы Дизеля за счет большей эффективности работы.

Двигатели внутреннего сгорания Отто отличаются интенсивным подводом топливно-воздушной смеси в свободный объем цилиндра через впускные клапаны в точке 1. Впуск осуществляется за счет разряжения, создаваемого прямым ходом поршня [18]. Графически термодинамический цикл Отто изображен на рис. 2, *а* (цикл II: $1–2^{/}–3^{/}–4^{/}$). В адиабатном процессе $1–2^{/}$ топливно-воздушная смесь сжимается, после чего поджигается свечей накаливания, и в процессе $2^{/}–3^{/}$ подводится теплота. Дальше в адиабатном процессе $3^{/}–4^{/}$ расширяется, совершая работу, и в изобарном процессе $4^{/}–1$ отводится теплота. Основной особенностью данного термодинамического цикла относительно цикла Тринклера является воспламенение топливно-воздушной смеси, которое осуществляется от свечи накаливания, поэтому давление внутри цилиндра относительно небольшое, не требует установки дорогостоящих форсунок высокого давления.

В газотурбинной установке, работающей по циклу Брайтона [19, 20] (рис. 2, *б*, цикл III: $1^{//}–2^{//}–3^{//}–4^{//}$), в адиабатном процессе $1^{//}–2^{//}$ воздух сжимается в компрессоре и поступает с топливом в камеру сгорания, где в изобарном процессе $2^{//}–3^{//}$ подводится теплота от горящего топлива. Из камеры сгорания смесь продуктов сгорания и воздуха непрерывно поступают в турбину, где в адиабатном процессе $3^{//}–4^{//}$ расширяется и совершает работу, после чего в изобарном процессе $4^{//}–1^{//}$ отдает теплоту в окружающую среду. При меньшем термическом КПД цикл Брайтона получил более широкое применение относительно цикла Гемфри за счет более простой и надежной конструкции камеры сгорания и газовой турбины.

В газотурбинной установке, работающей по циклу Гемфри [19–22], процесс подвода теплоты при сгорании топлива, осуществляется при постоянном объеме в камере сгорания. Графически термодинамический цикл Гемфри изображен на рис. 2, *б* (цикл IV: $1^{//}–2^{///}–3^{///}–4^{///}$). В компрессоре, установленном на одном валу с газовой турбиной, в адиабатном процессе $1^{//}–2^{///}$ сжимается воздух, который подается в камеру сгорания через впускной клапан. Одновременно с подводом воздуха в камеру сгорания подводится топливо с помощью топливного компрессора. При полностью закрытых впускных и выпускных клапанах происхо-

дит горение топлива в изохорном процессе $2^{//}$–$3^{///}$. В точке $3^{///}$ открывается выпускной клапан, через который смесь продуктов сгорания и воздуха поступает в газовую турбину, где в адиабатном процессе $3^{///}$–$4^{///}$ расширяется, приводя во вращение вал, после чего в изобарном процессе $4^{///}$–$1^{//}$ отдает теплоту в окружающую среду.

Математические модели термодинамических циклов ДВС и ГТУ представляют собой системы уравнений, характеризующие процессы сжатия, горения и расширения в поршневых двигателях внутреннего сгорания и газотурбинных установках.

Теплофизические и термодинамические параметры топлива, продуктов сгорания и воздуха определяются с помощью функций библиотеки «Refprop 8.0» [23].

#### Математические модели термодинамических циклов

Математические модели составляются для определения параметров рабочих тел в характерных точках каждого термодинамического цикла.

Определение параметров для газов и их смесей осуществлялось с помощью привязанных функций Refprop 8.0. Температура, объем, давление, энтальпия, энтропия и т. д. для воздуха, парогазовых продуктов пиролиза и продуктов их сгорания рассчитывались следующим образом:

$$\text{Argument}=\text{function}(\text{«I»; «II»; «III» ; «IV»; «V»}), \quad (1)$$

где Argument – искомый параметр; function – функция, которая описывает параметр: pressure – давление, temperature – температура, volume – удельный объем, enthalpy – энтальпия, entropy – энтропия; заполняемые поля внутри функции: «I» – название рабочего тела, либо смеси жидкостей/газов, «II» – параметры, по которым определяется данная функция, например, температура и давление – «TP», «III» – система измерения единиц – «SI», «IV» – значение первого параметра, «V» – значение второго параметра, по которому ищется функция.

Низшая теплота сгорания газа при нормальных условиях определяется по соотношению:

$$Q^{P}_{Н(НУ)}=\Sigma(Q^{P}_{Нi}\cdot g_i),\ \text{МДж/нм}^3, \quad (2)$$

где $Q^{P}_{Нi}$, МДж/нм$^3$ – низшая теплота сгорания компонента, определенная при н. у.; $g_i$, % – относительное содержание компонента в газе, определяемое при н. у.

Низшая теплота сгорания газа при заданных условиях определяется по соотношению:

$$Q^{P}_{Н}=Q^{P}_{Н(НУ)}\cdot\rho_t/\rho_{НУ},\ \text{МДж/нм}^3, \quad (3)$$

где $\rho_t$, кг/м$^3$ – плотность газа при заданной температуре $T_{ВХ}$; $\rho_{НУ}$, кг/м$^3$ – плотность газа при нормальных условиях.

##### Цикл Тринклера

Для расчета процессов цикла Тринклера были заданы следующие исходные параметры, состав газа и характеристики цикла:

- степень адиабатного сжатия воздуха в цилиндре ε;
- степень изохорного повышения давления в цилиндре λ при самовоспламенении топлива под давлением;
- степень изобарного расширения в цилиндре ДВС за счет подвода тепла ρ;
- коэффициенты политропы $n_1$ и $n_2$.

Параметры рабочего тела в узловых точках определяются по следующим выражениям:

- параметры воздуха после сжатия:

$$p_2=p_1\cdot\varepsilon^{n1},\ \text{МПа}, \quad (4)$$

$$T_2=T_1\cdot\varepsilon^{n1-1},\ °\text{C}, \quad (5)$$

$$h_2=\text{enthalpy}\ (\text{«air»; «TP»; SI; } T_2;\ p_2), \quad (6)$$

$$s_2=\text{entropy}\ (\text{«air»; «TP»; SI; } T_2;\ p_2); \quad (7)$$

- параметры продуктов сгорания и воздуха в конце изохорного подвода тепла:

$$p_3=p_2\cdot\lambda,\ \text{МПа}, \quad (8)$$

$$T_3=T_2\cdot\lambda,\ °\text{C}, \quad (9)$$

$$h_3=\text{enthalpy}\ (\text{«см»; «TP»; SI; } T_3;\ p_3), \quad (10)$$

где см – смесь продуктов сгорания и воздуха,

$$s_3=\text{entropy}\ (\text{«см»; «TP»; SI; } T_3;\ p_3); \quad (11)$$

- параметры продуктов сгорания при изобарном процессе подвода тепла:

$$T_4=T_3\cdot\rho,\ °\text{C}, \quad (12)$$

$$\upsilon_4=\upsilon_3\cdot\rho,\ \text{м}^3/\text{кг}, \quad (13)$$

$$p_4=p_3,\ \text{МПа}, \quad (14)$$

$$h_4=\text{enthalpy}\ (\text{«см»; «TP»; SI; } T_4;\ p_4), \quad (15)$$

$$s_4=\text{entropy}\ (\text{«см»; «TP»; SI; } T_4;\ p_4); \quad (16)$$

- параметры сгорания при изохорном отводе тепла:

$$p_5=p_4\cdot(\upsilon_4/\upsilon_5)^{n2},\ \text{МПа}, \quad (17)$$

$$\upsilon_5=\upsilon_4,\ \text{м}^3/\text{кг}, \quad (18)$$

$$T_5=\text{temperature}\ (\text{«см»; «PV»; SI; } p_5;\ \upsilon_5), \quad (19)$$

$$h_5=\text{enthalpy}\ (\text{«см»; «TP»; SI; } T_5;\ p_5), \quad (20)$$

$$s_5=\text{entropy}\ (\text{«см»; «TP»; SI; } T_5;\ p_5). \quad (21)$$

##### Цикл Отто

Цикл с подводом тепла при постоянном объеме – частный случай модели двигателя Тринклера. Для цикла Отто отсутствует подвод тепла при постоянном давлении. Задаваемые параметры аналогичны таковым для цикла Тринклера, степень изобарного расширения ρ=1.

##### Цикл Брайтона

- степень предварительного расширения при сгорании топлива:

$$\rho=\upsilon_{3''}/\upsilon_{4''}. \quad (22)$$

Параметры воздуха и продуктов сгорания топлива в узловых точках определяются по следующим соотношениям:

- после воздушного компрессора:

$$\upsilon_{2''}=\upsilon_{1''}/\pi^{(1/n1)},\ \text{м}^3/\text{кг}, \quad (23)$$

$$p_{2''}=p_{1''}\cdot\pi,\ \text{МПа}, \quad (24)$$

$T_{2''}$=temperature «см»; («PV»; SI; $p_{2''}$; $\upsilon_{2''}$), °C, (25)

$h_{2''}$ и $s_{2''}$ определяются аналогично соотношениям (6), (7);

- в камере сгорания:

$$\upsilon_{3''}= \upsilon_{2''}\cdot\rho,\ м^3/кг; \quad (26)$$

$$p_{3''}=p_{2''},\ МПа; \quad (27)$$

$h_{3''}$ и $s_{3''}$ определяются аналогично соотношениям (10), (11);

- после газовой турбины:

$$p_{4''}= p_{1''},\ МПа, \quad (28)$$

$$\upsilon_{4''}=\upsilon_{1''}\cdot(p_{3''}/p_{4''})^{1/n2},\ м^3/кг, \quad (29)$$

$T_{4''}$=temperature («см»; «PV»; SI; $p_{4''}$; $\upsilon_{4''}$), °C. (30)

Цикл Гемфри

Задаются исходные параметры, состав газа и следующие характеристики цикла:

- степень адиабатного повышения давления воздуха в компрессоре:

$$\pi=p_{2'''}/p_{1'''}; \quad (31)$$

- степень изохорного повышения давления продуктов сгорания за счет подвода тепла в камере сгорания:

$$\lambda=p_{3'''}/p_{2'''}. \quad (32)$$

Параметры воздуха и продуктов сгорания топлива в узловых точках определяются по следующим соотношениям:

- после воздушного компрессора аналогично циклу Брайтона (23)–(25);
- в камере сгорания:

$$\upsilon_{3'''}= \upsilon_{2'''}\cdot\rho,\ м^3/кг, \quad (33)$$

$$p_{3'''}=p_{2'''}\cdot\lambda,\ МПа, \quad (34)$$

$T_{3'''}$=temperature («см»; «PV»; SI; $p_{3'''}$; $\upsilon_{3'''}$), °C, (35)

$h_{3'''}$ и $s_{3'''}$ определяются аналогично соотношениям (10), (11);

- после газовой турбины:

$$\upsilon_{4'''}= \upsilon_{3'''}\cdot(p_{3'''}/p_{4'''})^{1/n2}, \quad (36)$$

$$p_{4'''}=p_{3'''},\ МПа, \quad (37)$$

$T_{4'''}$=temperature («см»; «TP»; SI; $p_{4'''}$; $\upsilon_{4'''}$), °C, (38)

$h_{4'''}$ и $s_{4'''}$ определяются аналогично соотношениям (15), (16).

Расчет показателей силового агрегата

Внутренний КПД для цикла Тринклера определяется по уравнению:

$$\eta_i=[(h_4-h_5)-(h_{2CM}-h_1)-\alpha_Г(h_{2TK}-h_{1'})]\cdot 100/(h_4-h_{2CM}),\ \%, \quad (39)$$

где $h_{2CM}$ – энтальпия смешения газов и воздуха в камере сгорания, определяется по тепловому балансу, кДж/кг; $h_{2TK}$ – энтальпия газов после топливного компрессора, кДж/кг; $\alpha_Г$ – коэффициент содержания газов в топливно-воздушной смеси.

Внутренний КПД для цикла Отто определяется по соотношению:

$$\eta_i=[(h_3-h_4)-(h_{2CM}-h_1)-\alpha_Г(h_{2TK}-h_{1'})]\cdot 100/(h_3-h_2),\ \%, \quad (40)$$

Внутренний КПД для циклов Брайтона, Гемфри определяется по уравнению:

$$\eta_i=[(h_3-h_4)-(h_{2CM}-h_1)]\cdot 100/(h_3-h_2),\ \%, \quad (41)$$

Абсолютный электрический КПД термодинамических циклов:

$$\eta_Э=\eta_i\cdot\eta_{ЭМ},\ \%, \quad (42)$$

где $\eta_{ЭМ}$=0,96 – КПД, учитывающий электромеханические потери.

Электрическая мощность рассчитывается из теплового баланса установки:

$$N_Э= Q^P_Г\cdot\eta_Э,\ \%. \quad (43)$$

На основе уравнений (1)–(43) для описанных моделей термодинамических циклов ДВС и ГТУ составлена программа, написанная в MS Office Excel с подключенными функциями свойств веществ «Refprop 8.0» [23].

Так как действительные процессы в ДВС и ГТУ имеют сложный характер, а рабочие тела (воздух, горючие газы, продукты сгорания и т. д.) представляют собой комплексные смеси различных веществ, были сделаны следующие допущения:

- рассматриваются замкнутые циклы;
- силовой агрегат работает в стационарном режиме;
- воздух имеет количественный состав: $N_2$ 79 %, $O_2$ 21 %, температура на входе в агрегат +15 °C;
- давление окружающей среды постоянное и имеет значение $p_1$=0,095 МПа;
- состав продуктов сгорания топлива определяется теоретическими объемами компонентов при сжигании 1 $м^3$ топлива.
- не учитываются тепловые и механические потери в оборудовании.
- приняты рекомендуемые параметры работы оборудования: коэффициенты политропы для циклов ГТУ $n_1$=1,41 и $n_2$=1,24, для ДВС: $n_1$=1,36 и $n_2$=1,24; $\varepsilon$=12; $\lambda$=1,3; $\rho$=1,2; $\pi$=12 [18–20].

Все представленные выше допущения позволяют проводить исследование термодинамических циклов силовых агрегатов в широком диапазоне параметров и состава газов.

С помощью программы были произведены расчеты при изменении температуры парогазовых продуктов пиролиза на входе в двигатель $T_{BX}$ в рекомендуемом диапазоне работы пиролизной установки 350–450 °C и при различных составах сжигаемого топлива. Полученные в результате расчета зависимости электрического КПД брутто и мощности двигателя от $T_{BX}$ приведены на рис. 3. График зависимости температуры уходящих газов от температуры $T_{BX}$ приведен на рис. 4. Следующее исследование заключалось в анализе мощностных характеристик силовых агрегатов от состава сжигаемого газа при смешивании парогазовых продуктов с $CH_4$ в пропорциях 0, 25, 50, 75 и 100 % от общего объема топлива при температуре $T_{BX}$=350 °C. Графическая зависимость электрической мощности, выдаваемой генератором от состава сжигаемого газа, приведена на рис. 5.

**Результаты и обсуждение**

Плотность исследуемых парогазовых продуктов при неизменном составе (таблица) зависит от давления и температуры: при атмосферном давлении и температуре 25 °С плотность исследуемых газов составляет 0,99 кг/м$^3$, при 350 °С плотность газа с заданным составом – 0,47 кг/м$^3$, при 400 °С – 0,44 кг/м$^3$, при 500 °С – 0,39 кг/м$^3$. Плотность в значительной степени определяет объем ($V_{ПП}$) выхода парогазовых продуктов при неизменной загрузке исходного сырья (500 кг/ч) в пиролизную установку (рис. 1): при 350 °С $V_{ПП}$ составляет 741 м$^3$/ч, при 400 °С – 800 м$^3$/ч, при 500 °С – 908 м$^3$/ч. Данный фактор определяет располагаемое тепло, вносимое с парогазовыми продуктами пиролиза в силовой агрегат – при увеличении температуры снижается $Q^P_Г$.

В термодинамическом цикле Тринклера воздух сжимается поршнем в процессе 1–2 до $p_2$=2,18 МПа и $t_2$=1154 °С; топливо подается под давлением $p_2$ в цилиндр и в процессе 2–3 и 3–4 в ходе изохорного и изобарного процессов подвода тепла температура газовоздушной смеси повышается до $t_4$=1879 °С; в процессе расширения газов в цилиндре 4–5 температура снижается до $t_4$=984 °С; в 5–1 уходящие газы удаляются из цилиндра.

В цикле Отто газо-воздушная смесь сжимается в процессе 1–2$^{/}$ до давления $p_{2'}$=2,83 МПа и $t_{2'}$=1154 °С, затем она воспламеняется свечой зажигания и в процессе изохорного подвода тепла 2$^{/}$–3$^{/}$ температура повышается до 1779 °С, далее газы толкают поршень и расширяются в процессе 3$^{/}$–4$^{/}$ при этом температура отвода выхлопных газов составляет $t_{4'}$=931 °С.

В цикле Брайтона воздух сжимается компрессором в процессе 1$^{//}$–2$^{//}$ до $p_{2''}$=1,14 МПа и $t_{2''}$=317 °С, в процессе 2$^{//}$–3$^{//}$ подводится тепло в постоянном объеме камеры сгорания, и температура газов повышается до $t_{3''}$=1094 °С, в турбине газы расширяются в процессе 3$^{//}$–4$^{//}$ и удаляются с $t_{4''}$=574 °С.

В цикле Гемфри воздух сжимается воздушным компрессором в процессе 1$^{//}$–2$^{///}$ до $p_{2'''}$=1,14 МПа и $t_{2'''}$=317 °С, в процессе 2$^{///}$–3$^{///}$ в камере сгорания за счет сжигания топлива в окислительной среде сжатого воздуха подводится тепло при постоянном давлении, температура газов повышается до $t_{3'''}$=1198 °С, в турбине газы расширяются в процессе 3$^{///}$–4$^{///}$, производя работу на валу, и удаляются в атмосферу при $t_{4'''}$=594 °С.

На рис. 3 приведена зависимость КПД и мощности от $T_{ВХ}$ для всех рассматриваемых термодинамических циклов. Она имеет линейный характер. Показатели эффективности работы установок – электрической мощности и абсолютного электрического КПД для циклов Тринклера и Отто – незначительно снижаются при повышении $T_{ВХ}$, а для циклов Брайтона и Гемфри повышаются. Увеличение КПД для термодинамических циклов Брайтона, Отто при повышении $T_{ВХ}$ обусловлено ростом соотношения производимой работы к подводимому теплу.

Мощностная характеристика для двигателя, работающего по термодинамическому циклу Тринклера, при повышении $T_{ВХ}$ на 5 °С в силовой агрегат снижается на 0,57 %. Воспламенение топливно-воздушной смеси происходит за счет сжатия в цилиндре, при более высокой температуре подвода тепла требуется создание большего давления. Наибольшим приростом мощности и КПД при увеличении начальной температуры газов обладает газотурбинная установка, работающая по термодинамическому циклу Брайтона. В данном случае увеличение $T_{ВХ}$ приводит к снижению относительной доли подвода тепла в камере сгорания, за счет чего растет эффективность ГТУ и температура на входе в турбину. Увеличение температуры газов при их неизменном составе на входе газовую турбину способствует повышению ее мощности.

В базовом режиме работы пиролизной установки, выдающей температуру парогазовых продуктов на выходе $T_{ВХ}$=350 °С, наибольшей эффективностью обладает двигатель, работающий по термодинамическому циклу Тринклера с абсолютным электрическим КПД 23,34 % и мощностью 96,6 кВт. Высокие показатели при относительно низкой $T_{ВХ}$ цикла Тринклера обусловлены комбинированным способом подвода тепла. При температуре $T_{ВХ}$=350 °С термодинамический цикл Брайтона имеет $\eta_Э$=14,19 %, Отто – 20,63 %, Гемфри – 22,28 %. При увеличении температуры до $T_{ВХ}$=450 °С абсолютный электрический КПД растет, а электрическая мощность ДВС и ГТУ снижается, что видно на рис. 3, при этом для цикла Гемфри отмечен рост мощности. Снижение электрической мощности связано с уменьшением располагаемого тепла, вносимого с парогазовыми продуктами пиролиза при более высокой температуре. Увеличение термического и электрического КПД связано с увеличением температуры подвода тепла в циклах. При температуре 450 °С наибольшим КПД обладает ГТУ цикла Гемфри – 26,41 % и ДВС цикла Тринклера – 23,97 %.

Для ГТУ при заданных параметрах работы в рассмотренном температурном диапазоне цикл Гемфри имеет мощность и КПД выше, чем цикл Брайтона. Это связано с большой мощностью газовой турбиной при неизменных параметрах работы установок (рис. 2).

При анализе данных, полученных при изменении начальной температуры ППП, представленных на рис. 3, *а*, *б*, видно, что для термодинамических циклов Тринклера и Отто электрический КПД возрастает, при этом мощность падает при увеличении $T_{ВХ}$. Как упоминалось ранее, при росте температуры низшая теплота сгорания ППП, отнесенная к объему, уменьшается, поэтому вносимое тепло снижается. В свою очередь абсолютный электрический КПД цикла зависит от термического КПД. Для термодинамических циклов двигателей внутреннего сгорания начальная температура топлива не оказывает значительного влияния на среднюю температуру подвода тепла. Температура подвода тепла в ДВС зависит в большей степени от степени сжатия и давления подаваемого воздуха и топлива.

При рассмотрении данных мощности и КПД для термодинамических циклов Брайтона и Гемфри отмечена прямая зависимость – при росте начальной тем-

пературы газов показатели увеличиваются. В ГТУ газ, подаваемый в камеру сгорания, окисляется и горит в постоянном объеме камеры сгорания, имеются отличия в способе подачи топлива и отвода продуктов сгорания. Поэтому повышение температуры подвода топлива приводит к увеличению температуры продуктов сгорания на входе в газовую турбину, следовательно, возрастает теплоперепад и мощность, генерируемая установкой. При увеличении температуры газов в термодинамическом цикле повышается средняя температура подвода тепла, следовательно, растет термический и абсолютный электрический КПД.

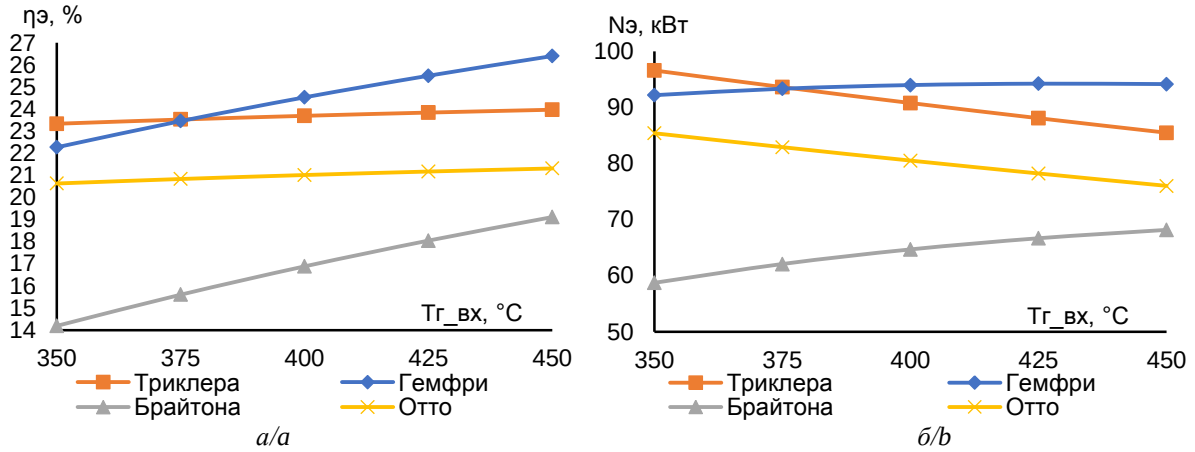



***Рис. 3.*** *Зависимость изменения электрического КПД (а) и мощности (б) двигателя от начальной температуры парогазовых продуктов пиролиза*

***Fig. 3.*** *Dependence of the change of electrical efficiency (a) and power (b) of the power-unit on the initial stem product pyrolysis (SPP) temperature*

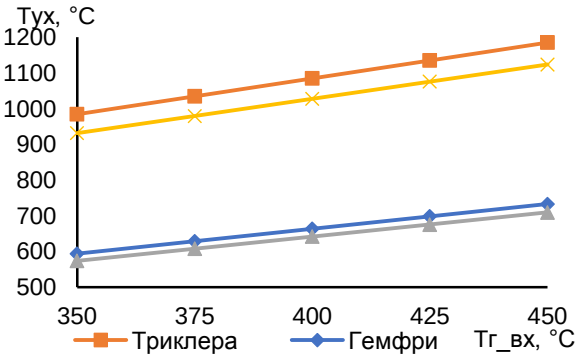



***Рис. 4.*** *Зависимость изменения температуры уходящих газов силового агрегата от температуры парогазовых продуктов на входе в двигатель*

***Fig. 4.*** *Dependence of the change in the temperature of the outgoing gases of the power-unit on the initial SPP temperature*

На рис. 4 приведены зависимости изменения температуры уходящих газов $T_{УХ}$ от $T_{ВХ}$ для всех рассматриваемых термодинамических циклов, которые имеют линейный характер. Температуры $T_{УХ}$ для циклов Тринклера и Отто имеют значения выше 900 °С при $T_{ВХ}$=350 °С и при росте $T_{ВХ}$ линейно возрастают. Температуры $T_{УХ}$ для циклов Гемфри и Брайтона имеют значения ниже 600 °С при $T_{ВХ}$=350 °С и при росте $T_{ВХ}$ линейно возрастают. При этом наклон всех линейных зависимостей $T_{УХ}$ от $T_{ВХ}$ имеет равное значение, кривые не пересекаются.

Температура уходящих газов на выходе из силового агрегата для каждого выбранного термодинамического цикла с заданными параметрами имеет свой диапазон. Полученные кривые (рис. 4) имеют линейный характер для всех исследуемых циклов: $T_{УХ}$ повышается при увеличении $T_{ВХ}$. Рост $T_{УХ}$ объясняется переходом режима работы агрегата в область более высоких температур подвода тепла при неизменных параметрах ε, λ, ρ, π.

Температура газов $T_{УХ}$ для агрегата, работающего по термодинамическому циклу Брайтона, во всем исследуемом диапазоне температур имеет наименьшие значения: в базовом режиме при $T_{ВХ}$=350–450 °С $T_{УХ}$=574–710 °С. Низкая температура $T_{УХ}$ на рис. 4 объясняется высокой тепловой отдачей в газовой турбине, которая вырабатывает наибольшую мощность в заданных условиях (рис. 3, *б*).

Для агрегата, работающего по термодинамическому циклу Тринклера, при $T_{ВХ}$=350 °С $T_{УХ}$=984 °С и далее увеличивается с ростом температуры ППП на входе в камеру сгорания.

На рис. 5 приведены данные зависимости электрической мощности выдаваемого генератором силового агрегата от состава сжигаемого газа. В качестве основных компонентов газа были выбраны метан ($CH_4$) и парогазовые продукты пиролиза (таблица). Эти два компонента предполагается смешивать объемных долях 0/100, 25/75, 50/50, 75/25, 100/0. При этом в качестве вторичного компонента используется ППП. Цель данного исследования – изучить возможность использования газовых смесей на основе $CH_4$ и ППП в качестве топлива для силового агрегата, генерирующего электрическую энергию.

При увеличении в топливной смеси содержания природного газа ($CH_4$) при температуре 350 °С мощность электрогенератора значительно возрастает. Во-первых, низшая теплота сгорания метана составляет $Q^{р}_{н}$=35,88 МДж/нм$^3$, в то время как для ППП

$Q^{P}_{H}$=9,01 МДж/нм$^3$ (таблица). Во-вторых, метан имеет меньшую плотность, поэтому его объемный выход значительно больше, чем ППП. В камере сгорания сжигается большее количество топлива с более высокой теплотворной способностью. На рис. 5 видно, что при полном замещении ППП метаном мощность агрегатов возрастает приблизительно в 4 раза. В реальных условиях оборудование не может иметь такой рабочий диапазон.

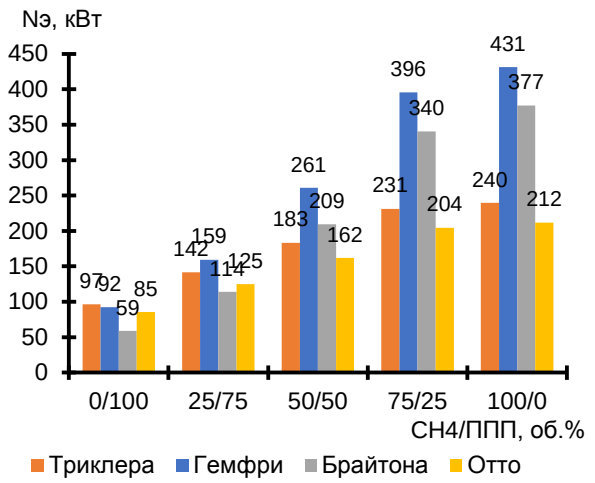



***Рис. 5.*** *Зависимость изменения электрической мощности от состава газов ($CH_4$/парогазовые продукты пиролиза, об. %) на входе в силовой агрегат*

***Fig. 5.*** *Dependence of electrical power change of the power-unit on the composition of gases ($CH_4$/ SPP, vol. %)*

На совмещенной установке пиролиза древесных отходов и электрогенератора, использующего в качестве основного топлива ППП для удовлетворения роста в потребностях электрической энергии, можно к исходному составу парогазовых продуктов пиролиза подмешивать природный газ – метан. При увеличении объемного содержания метана в ППП на 25 % электрическая мощность ДВС возрастает на 46–47 %, ГТУ – на 73–93 % (рис. 5). При эксплуатации силового агрегата, генерирующего электроэнергию и использующего в качестве основного топлива сжатый природный газ, подмешивание парогазовых продуктов пиролиза с объемным содержанием 25 % приводит к снижению мощности на 8–10 %, что является допустимым условием эксплуатации.

### Предложения по направлению дальнейших исследований

Для более подробного рассмотрения каждого силового агрегата требуется поиск и оптимизация рабочих параметров и процессов оборудования, определение конструктивных особенностей при работе на парогазовых продуктах пиролиза при высокой температуре подвода топливно-воздушной смеси. Высокую температуру уходящих газов из силового агрегата можно снижать путем преобразования энергии в нижнем цикле Ренкина. Уходящие газы направляются в теплообменник противоточного типа, в котором тепловая энергия передается через поверхности нагрева нижнему контуру. Рабочее тело нагревается в теплообменнике, преобразуется в пар и направляется в паровую турбину, где расширяется в проточной части, передавая энергию расширения в энергию на валу. Таким образом, можно снизить температуру продуктов сгорания до температуры 100–120 °С, а суммарный КПД по выработке электроэнергии может достичь 45–50 % [24, 25].

Проведенные расчеты показывают, что высокие КПД, мощность и температура уходящих газов термодинамического цикла Тринклера относительно всех рассмотренных циклов делают его привлекательным для исследований совместной работы с нижним контуром, который работает на органическом цикле Ренкина.

### Выводы

1. Разработана и предложена схема получения парогазовых продуктов пиролиза и их последующее использование в качестве основного или вспомогательного энергоносителя для генерации электрической энергии. Рассмотрены двигатели внутреннего сгорания и газотурбинные установки, работающие на четырех термодинамических циклах: Тринклера, Отто, Брайтона и Гемфри. Составлена математическая модель для определения показателей эффективности генерации электрической энергии при сжигании парогазовых продуктов пиролиза.
2. Для рассмотренных термодинамических циклов проведен численный анализ влияния температуры парогазовых продуктов пиролиза на входе в силовой агрегат на электрическую мощность, КПД и температуру уходящих газов из силового агрегата. Определено, что рост $T_{ВХ}$ снижает мощность и КПД для силовых агрегатов, работающих по циклам Тринклера и Гемфри, и приводит к повышению показателей эффективности для циклов Отто и Брайтона. Для базовой температуры, при которой в пиролизной установке образуются парогазовые продукты (350 °С), наибольшей электрической мощностью $N_Э$=96,6 кВт и КПД $\eta_Э$=23,34 % обладает двигатель Тринклера и газотурбинная установка Брайтона: $N_Э$=92,2 кВт и КПД $\eta_Э$=22,28 %.
3. Для всех рассмотренных агрегатов рост $T_{ВХ}$ приводит к линейному увеличению $T_{УХ}$. Наибольшими значениями температур $T_{УХ}$ обладают двигатели внутреннего сгорания (Тринклера и Отто). Высокие температуры $T_{УХ}$ совместно с высоким электрическим КПД рассмотренных установок позволяют их рассматривать в качестве верхнего цикла для утилизации тепла уходящих газов в цикле Ренкина на ОРТ.
4. Выявлено, что использование метана в качестве примеси для парогазовых продуктов пиролиза позволяет увеличить вырабатываемую электроэнергию: для силового агрегата, работающего на термодинамическом цикле Тринклера, объемное содержание $CH_4$ 25 % и ППП 75 % в сжигаемом газе приводит к увеличению электрической мощности на 46 % относительно электродвигателя, сжигающего газ, состоящий из 100 % ППП.

*Работа выполнена при финансовой поддержке в соответствии с дополнительным соглашением № 075-03-2021-138/3 о предоставлении субсидии из федерального бюджета на финансовое обеспечение выполнения государственного задания на оказание государственных услуг (внутренний номер 075-ГЗ/Х4141/687/3).*

## СПИСОК ЛИТЕРАТУРЫ

1. King R., Tingas E.-A. Potential for carbon-neutral advanced biofuels in UK road transport // Journal of Energy Engineering. – 2021. – V. 147 (4). – P. 04021025.
2. Jha G., Soren S., Deo Mehta K. Partial substitution of coke breeze with biomass and charcoal in metallurgical sintering // Fuel. – 2020. – V. 278. – P. 118350.
3. Progress on the lignocellulosic biomass pyrolysis for biofuel production toward environmental sustainability / A.T. Hoang, H.C. Ong, I.M.R. Fattah, R. Sakthivel // Fuel Processing Technology. – 2021. – V. 223. – P. 106997.
4. Balat M., Kirtay E., Balat H. Main routes for the thermo-conversion of biomass into fuels and chemicals. P. 1: Pyrolysis systems // Energy Conversion and Management. – 2009. – № 50 (12). – P. 3147–3157.
5. Biofuels production through biomass pyrolysis – a technological review / M.I. Jahirul, M.G. Rasul, A.A. Chowdhury, N. Ashwath // Energies. – 2012. – № 5 (12). – P. 4952–5001.
6. Получение брикетированного полукокса из древесных отходов методом стадийного низкотемпературного пиролиза / К.Б. Ларионов, С.А. Янковский, В.Е. Губин, А.А. Улько // Кокс и химия. – 2020. – № 12. – С. 40–48.
7. Norms and standards for pyrolysis liquids. End-user requirements and specifications / A. Oasmaa, C. Peacocke, S. Gust, D. Meier, R. McLellan // Energy and Fuels. – 2005. – № 19 (5). – P. 2155–2163.
8. Kan T., Strezov V., Evans T.J. Lignocellulosic biomass pyrolysis: a review of product properties and effects of pyrolysis parameters // Renewable and Sustainable Energy Reviews. – 2016. – № 57. – P. 1126–1140.
9. Valorization of pyrolysis water: a biorefinery side stream, for 1,2-propanediol production with engineered Corynebacterium glutamicum / J. Lange, F. Müller, K. Bernecker, R. Takors // Biotechnology for Biofuels. – 2017. – № 10 (1). – P. 277–290.
10. Balat M., Kirtay E., Balat H. Main routes for the thermo-conversion of biomass into fuels and chemicals. P. 2: Gasification systems // Energy Conversion and Management. – 2009. – № 50 (12). – P. 3158–3168.
11. Autothermal and allothermal pyrolysis in a continuous fixed bed reactor / M. Milhé, L. Van De Steene, M. Haube, W.-F. Fassinou // Journal of Analytical and Applied Pyrolysis. – 2013. – № 103. – P. 102–111.
12. Feasibility of running a micro gas turbine on wood-derived fast pyrolysis bio-oils: Effect of the fuel spray formation and preparation / M. Broumand, M.S. Khan, S. Yun, Z. Hong // Renewable Energy. – 2021. – № 178. – P. 775–784.
13. Experimental investigation of performance and emission characteristics of a miniature gas turbine supplied by blends of kerosene and waste tyre pyrolysis oil / T. Suchocki, L. Witanowski, P. Lampart, K. Januszewicz // Energy. – 2021. – V. 215. – P. 119125.
14. Devaraj J., Robinson Y., Ganapathi P. Experimental investigation of performance, emission and combustion characteristics of waste plastic pyrolysis oil blended with diethyl ether used as fuel for diesel engine // Energy. – 2015. – № 85. – P. 304–309.
15. Environmental pollution cost analysis of a diesel engine fueled with biogas-diesel-tire pyrolytic oil blends / N. Tunç, M. Karagöz, B. Çiftçi, E. Deniz // Engineering Science and Technology, an International Journal. – 2021. – № 24 (3). – P. 631–636.
16. Production and utilization of pyrolysis oil from solidplastic wastes: a review on pyrolysis process and influence of reactors design / M. Sekar, V.K. Ponnusamy, A. Pugazhendhi, S. Nižetić // Journal of Environmental Management. – 2022. – № 302. – P. 114046.
17. Sharma A., Murugan S. Combustion analysis of a diesel engine run on non-conventional fuel at different nozzle injection pressure // Lecture Notes in Mechanical Engineering. – 2022. – Part F1. – P. 109–118.
18. Мусабеков М.О., Жаманкулов М.Ж., Мусабекова А.М. Метод исследования влияния новых видов топлив на показатели рабочего процесса ДВС // Вестник Казахской академии транспорта и коммуникаций им. М. Тынышпаева. – 2012. – № 4 (77). – С. 10–16.
19. Турбины тепловых и атомных электростанций / А.Г. Костюк, В.В. Фролов, А.Е. Булкин, А.Д. Трухний. 2-е изд., перераб. и доп. – М.: Изд-во МЭИ, 2001. – 488 с.
20. Круглов В.И., Султанов В.А., Вареник В.В. Методические указания к выполнению расчетных заданий по курсу Термодинамика и теплопередача. – Казань: Казан. ун-т, 2017. – 46 с.
21. Щипаков В.А., Тарасов А.И. Перспективы использования пульсирующих детонационных технологий в турбореактивных двигателях // Авиационно-космическая техника и технология. – 2011. – № 9 (86). – С. 46–50.
22. Коньков А.Ю., Тимошенко Д.В. Газотурбинные установки для транспорта газа. – Хабаровск: Изд-во Тихооеан. гос. ун-та, 2016. – 151 с.
23. Lemmon E.W., Huber M.L., McLinden M.O. Reference fluid thermodynamic and transport properties «REFPROP». 2013. URL: https://www.nist.gov/programs-projects/reference-fluid-thermodynamic-and-transport-properties-database-refprop (дата обращения 21.11.2021).
24. Галашов Н.Н., Цибульский С.А. Параметрический анализ схемы парогазовой установки с комбинацией трех циклов для повышения КПД при работе в северных газодобывающих районах // Известия Томского политехнического университета. Инжиниринг георесурсов. – 2019. – Т. 330. – № 5. – С. 44–55.
25. Galashov N.N., Tsibulskii S.A. Thermal efficiency of three-cycle utilization-type steam-gas units // Power Technology and Engineering. – 2015. – № 48 (6) – P. 459–463.

*Поступила 13.01.2022 г.*

### Информация об авторах

***Цибульский С.А.***, кандидат технических наук, доцент НОЦ И.Н. Бутакова Инженерной школы энергетики Национального исследовательского Томского политехнического университета.

***Ларионов К.Б.***, кандидат технических наук, доцент НОЦ И.Н. Бутакова Инженерной школы энергетики Национального исследовательского Томского политехнического университета.

***Слюсарский К.В.***, кандидат физико-математических наук, доцент НОЦ И.Н. Бутакова Инженерной школы энергетики Национального исследовательского Томского политехнического университета.

***Галашов Н.Н.***, кандидат технических наук, доцент НОЦ И.Н. Бутакова Инженерной школы энергетики Национального исследовательского Томского политехнического университета.

***Гаспарян Г.Д.***, доктор технических наук, профессор, генеральный директор ООО «Сибирский Биоуголь».

***Улько А.А.***, заместитель генерального директора ООО «Сибирский Биоуголь».

UDC 621.432.3; 621.438.081; 621.438.082

# EVALUATION OF THE EFFICIENCY OF APPLYING WOOD PYROLYSIS STEAM-GAS PRODUCTS AS A WORKING FLUID FOR GAS TURBINE AND INTERNAL COMBUSTION ENGINE

**Svyatoslav A. Tsibulskiy**[1],
stzibulsky@tpu.ru

**Kirill B. Larionov**[1],
laryk070@gmail.com

**Konstantin V. Slyusarsky**[1],
slyuskonst@gmail.com

**Nikolay N. Galashov**[1],
gal@tpu.ru

**Garik D. Gasparyan**[2],
garik.gasparian@yandex.ru

**Alexander A. Ulko**[2],
ulkoalexandr@gmail.ru

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

[2] OOO «Sibirskiy Biougol»,
33, Voskresenskaya street, Kaluga, 248000, Russia.

***The relevance*** *of the topic is caused by the possibility of using such energy resource as a steam-gas products of pyrolysis of wood waste as the main or auxiliary fuel for electrical energy generation. These areas associated with a decrease in carbon emissions will allow expanding the scope of pyrolysis as a means of processing industrial waste, minimizing their impact on the environment.*
***The main aim*** *is to study the issues of increasing the efficiency of electric power generation of internal combustion engines and gas turbine plants working on pyrolysis products of wood waste in order to reduce the consumption of non-renewable energy resources, such as coal, oil and natural gas.*
***Objects:*** *wood waste pyrolysis unit, internal combustion engines and gas turbine plants operating using steam-gas products of wood waste pyrolysis.*
***Methods:*** *numerical research methods based on mathematical simulation of systems and elements of internal combustion engines and gas turbine plants based on material and energy balances.*
***Results.*** *The authors have developed a mathematical model and a simulation program for internal combustion engines and gas turbines burning steam-gas pyrolysis products. A parametric analysis on the influence of the steam-gas products outlet temperature from the pyrolysis plant on the efficiency, electric power and temperature of the exhaust gases of the considered power units was carried out. It was found that for utilization of steam-gas pyrolysis products in order to obtain electrical energy, the most efficient solution is an internal combustion engine operating via Trinkler thermodynamic cycle and a gas turbine unit using according to Brayton thermodynamic cycle, while the absolute electrical efficiency in the nominal operating mode of the pyrolysis unit is 23,34 and 22,28 % respectively. It was found that when using steam-gas pyrolysis products as an auxiliary fuel together with methane with a volumetric fraction of 25 %, the decrease in the power of the power unit is expected to be no more than 10 %.*

***Key words:***
*Pyrolysis, steam-gas products, thermodynamic cycle, internal combustion engine, gas turbine unit, mathematical model.*

*The research was financially supported according to the additional agreement no. 075-03-2021-138/3 on aid grant from the Federal budget for financing the fulfillment of the State task in public service delivery (inner no. 075-Г3/Х4141/687/3).*

## REFERENCES

1. King R., Tingas E.-A. Potential for carbon-neutral advanced biofuels in UK road transport. *Journal of Energy Engineering*, 2021, vol. 147 (4), pp. 04021025.
2. Jha G., Soren S., Deo K. Mehta Partial substitution of coke breeze with biomass and charcoal in metallurgical sintering. *Fuel*, 2020, vol. 278, pp. 118350.
3. Hoang A.T., Ong H.C., Fattah I.M.R., Sakthivel R. Progress on the lignocellulosic biomass pyrolysis for biofuel production toward environmental sustainability. *Fuel Processing Technology*, 2021, vol. 223, pp. 106997.
4. Balat M., Kirtay E., Balat H. Main routes for the thermo-conversion of biomass into fuels and chemicals. P. 1: Pyrolysis systems. *Energy Conversion and Management*, 2009, no. 50 (12), pp. 3147–3157.
5. Jahirul M.I., Rasul M.G., Chowdhury M.G., Ashwath N. Biofuels production through biomass pyrolysis – a technological review. *Energies*, 2012, no. 5 (12), pp. 4952–5001.
6. Larionov K.B., Yankovsky S.A., Gubin V.E., Ulko A.A. Production of briquetted semicoke from wood waste by multistep low-temperature pyrolysis. *Coke and Chemistry*, 2020, no. 63 (12), pp. 592–598.
7. Oasmaa A., Peacocke C., Gust S., Meier D., McLellan R. Norms and standards for pyrolysis liquids. End-user requirements and specifications. *Energy and Fuels*, 2005, no. 19 (5), pp. 2155–2163.
8. Kan T., Strezov V., Evans T.J. Lignocellulosic biomass pyrolysis: a review of product properties and effects of pyrolysis parameters.

*Renewable and Sustainable Energy Reviews*, 2016, no. 57, pp. 1126–1140.
9. Lange J., Müller F., Bernecker K., Takors R. Valorization of pyrolysis water: a biorefinery side stream, for 1,2-propanediol production with engineered Corynebacterium glutamicum. *Biotechnology for Biofuels*, 2017, no. 10 (1), pp. 277–290.
10. Balat M., Kirtay E., Balat H. Main routes for the thermoconversion of biomass into fuels and chemicals. P. 2: Gasification systems. *Energy Conversion and Management*, 2009, no. 50 (12), pp. 3158–3168.
11. Milhé M., Van De Steene L., Haube M., Fassinou W.-F. Autothermal and allothermal pyrolysis in a continuous fixed bed reactor. *Journal of Analytical and Applied Pyrolysis*, 2013, no. 103, pp. 102–111.
12. Broumand M., Khan M.S., Yun S., Hong Z. Feasibility of running a micro gas turbine on wood-derived fast pyrolysis bio-oils: effect of the fuel spray formation and preparation. *Renewable Energy*, 2021, no. 178, pp. 775–784.
13. Suchocki T., Witanowski L., Lampart P., Januszewicz K. Experimental investigation of performance and emission characteristics of a miniature gas turbine supplied by blends of kerosene and waste tyre pyrolysis oil. *Energy*, 2021, vol. 215, no. 119125.
14. Devaraj J., Robinson Y., Ganapathi P. Experimental investigation of performance, emission and combustion characteristics of waste plastic pyrolysis oil blended with diethyl ether used as fuel for diesel engine. *Energy*, 2015, no. 85, pp. 304–309.
15. Tunç N., Karagöz M., Çiftçi B., Deniz E. Environmental pollution cost analysis of a diesel engine fueled with biogas-diesel-tire pyrolytic oil blends. *Engineering Science and Technology, an International Journal*, 2021, no. 24 (3), pp. 631–636.
16. Sekar M., Ponnusamy V.K., Pugazhendhi A., Nižetić S. Production and utilization of pyrolysis oil from solidplastic wastes: a review on pyrolysis process and influence of reactors design. *Journal of Environmental Management*, 2022, no. 302, pp. 114046.
17. Sharma A., Murugan S. Combustion analysis of a diesel engine run on non-conventional fuel at different nozzle injection pressure. *Lecture Notes in Mechanical Engineering*, 2022, P. F1, pp. 109–118.
18. Kruglov V.I., Sultanov V.A., Varenik V.V. *Metodicheskie ukazaniya k vypolneniyu raschetnyh zadaniy po kursu Termodinamika i teploperedacha* [Methodical instructions for performing settlement tasks at the rate of thermodynamics and heat transfer]. Kazan, Kazan University publ., 2017. 46 p.
19. Kostyuk A.G., Frolov V.V., Bulkin A.E., Trukhniy A.D. *Turbiny teplovykh i atomnykh elektrostantsy* [Turbines of thermal and nuclear power plants]. Moscow, MEI Publ., 2001. 488 p.
20. Musabekov M.O., Zhamankulov M.Zh., Musabekova A.M. Metod issledovaniya vliyaniya novykh vidov topliv na pokazateli rabochego protsessa DVS [Method for studying the influence of new types of fuels on the performance of the engine workflow]. *Vestnik Kazakhskoy akademii transporta i kommunikatsy im. M. Tynyshpaeva*, 2012, no. 4 (77). pp. 10–16.
21. Shchipakov V.A., Tarasov A.I. Perspektivy ispolzovaniya pulsiruyushchikh detonatsionnykh tekhnology v turboreaktivnykh dvigatelyakh [Prospects for using pulsating detonation technologies in turbojet engines]. *Aviatsionno-kosmicheskaya tekhnika i tekhnologiya*, 2011, no. 9 (86), pp. 46–50.
22. Konkov A.Yu., Timoshenko D.V. *Gazoturbinnye ustanovki dlya transporta gaza* [Gas turbine gas transportation]. Khabarovsk, Pacific National University publ., 2016. 151 p.
23. Lemmon E.W., Huber M.L., McLinden M.O. *Reference fluid thermodynamic and transport properties «REFPROP». 2013*. Available at: https://www.nist.gov/programs-projects/reference-fluid-thermodynamic-and-transport-properties-database-refprop (accessed 21 November 2021).
24. Galashov N.N., Tsibulskiy S.A. Parametric analysis of the diagram of the combined cycle gas turbine with a combination of three cycles for improving efficiency when operating in northern gas producing areas. *Bulletin of the Tomsk Polytechnic University*. *Geo Assets Engineering*, 2019, vol. 330, no. 5, pp. 44–55. In Rus.
25. Galashov N.N., Tsibulskii S.A. Thermal Efficiency of Three-Cycle Utilization-Type Steam-Gas Units. *Power Technology and Engineering*, 2015, no. 48 (6), pp. 459–463.

*Received: 13 January 2022.*

**Information about the authors**

***Svyatoslav A. Tsibulskiy***, Cand. Sc., associate professor, National Research Tomsk Polytechnic University.
**N*ikolay N. Galashov***, Cand. Sc., associate professor, National Research Tomsk Polytechnic University.
***Kirill B. Larionov***, Cand. Sc., associate professor, National Research Tomsk Polytechnic University.
***Konstantin V. Slyusarsky***, Cand. Sc., associate professor, National Research Tomsk Polytechnic University.
***Garik D. Gasparyan,*** Dr. Sc., professor, chief executive manager, LTD «Sibirskiy Biougol»
***Alexander A. Ulko***, vice manager, LTD «Sibirskiy Biougol».

УДК 622.276.53.054.4

# ТЕМПЕРАТУРНЫЙ РЕЖИМ УСТЬЕВОГО КОМПРЕССОРА ДЛЯ ОТКАЧКИ ГАЗА ИЗ ЗАТРУБНОГО ПРОСТРАНСТВА НЕФТЯНОЙ СКВАЖИНЫ

**Уразаков Камил Рахматуллович**[1],
urazakk@mail.ru

**Латыпов Булат Маратович**[1],
bulatti@hotmail.com

**Белозеров Виктор Владимирович**[1],
belozerovvv51@list.com

[1] Уфимский государственный нефтяной технических университет,
Россия, 450062, г. Уфа, ул. Космонавтов, 1.

***Актуальность*** *исследования обусловлена необходимостью снижения давления затрубного газа в нефтяных скважинах, оборудованных штанговыми скважинными насосными установками при высоких давления в коллекторе и перспективном использовании устьевых компрессоров для решения данной проблемы. Описаны условия эксплуатации компрессоров и режимы их работы.*
***Цель*** *работы заключается в оценке влияния температуры окружающей среды на производительность компрессора, и в определении целесообразности установки системы охлаждения или теплоизоляции.*
***Методы:*** *физико-математическая модель работы одноступенчатого устьевого компрессора с приводом от станка-качалки; основные уравнения для описания термодинамических процессов в компрессоре описываются с помощью первого начала термодинамики и закона сохранения массы газа в цилиндре компрессора. В разработанной модели учитывается механическая работа, кинетическая и тепловая энергия. При этом принято допущение, что откачиваемый газ идеальный. Математическая модель работы компрессора реализована на языке программирования Python.*
***Результаты.*** *Анализ влияния тепловых процессов на работу устьевого компрессора показал значимый эффект температуры окружающей среды на производительность компрессора. По результатам расчетов было установлено, что при низких температурах производительность компрессора выше, чем при высоких. Установка радиатора негативно сказалась на производительности компрессора, особенно при низких давлениях на приеме. Установка теплоизоляции напротив позволила несколько увеличить производительность компрессора, но не значительно. Основным фактором, влияющим на производительность компрессора, является давление на приеме (величина перепада давления), поэтому в начальный период работы компрессора, когда давление на приеме приближается к линейному давлению в трубопроводе, производительность компрессора высока.*

***Ключевые слова:***
*Штанговый насос, устьевой компрессор, температурный режим, производительность компрессора, станок-качалка.*

## Введение

Механизированная добыча нефти сопровождается частичной сепарацией попутного нефтяного газа на приеме скважинных насосов и его накоплением в затрубном пространстве.

Рост давления в затрубном пространстве скважины приводит к росту противодавления на нефтяной пласт и к уменьшению притока жидкости к забою, что сопровождается «отжатием» динамического уровня жидкости к приему насоса. Низкий уровень погружения насоса в жидкости может привести к попаданию газа в насос, снижению и срыву его подачи. Наиболее часто такие явления возникают при высоких давлениях в выкидных линиях скважин, что приводит к высокому давлению газа в затрубном пространстве скважины.

Снижение затрубного давления газа позволяет увеличить добычу нефти, поэтому разработка технологии принудительной откачки газа из затрубного пространства добывающих скважин является актуальной задачей. Решению этой задачи посвящен ряд работ [1–6].

Наиболее простым техническим решением, реализующим откачку газа из затрубного пространства скважины, является использование поршневых компрессоров с приводом от станка-качалки. Использование компрессоров с приводом от балансира станка-качалки известно уже достаточно давно [2, 7]. Принцип работы подвесного компрессора заключается в передаче возвратно-поступательного движения балансира поршню в цилиндре компрессора, осуществляющего откачку газа из затрубного пространства скважины через всасывающий клапан и закачку в выкидную линию через нагнетательный клапан. При этом одна часть компрессора (цилиндр или поршень) шарнирно соединена с какой-либо точкой стойки балансира, а другая – с какой-либо точкой самого балансира (рис. 1).

Технология применения подвесных компрессоров отечественного и импортного (США) производства реализована в ОАО «Оренбургнефть» и ПАО «Татнефть». Дополнительная добыча нефти составила 0,4…2,7 т/сут на одну скважину, при этом выявлено, что количество дополнительно добытой нефти во многом зависит от давления в выкидном коллекторе. [5].

Одним из факторов, влияющих на эффективность работы поршневых компрессоров, является температурный режим эксплуатации. Известно, что в процессе работы компрессора газ сжимается, выделяя неко-


DOI 10.18799/24131830/2022/1/3516

торое количество теплоты, поэтому зачастую в компрессорах устанавливается система охлаждения. Это необходимо с одной стороны для исключения перегрева деталей компрессора, а с другой – для повышения эффективности компрессора, поскольку для сжатия нагретого газа энергии необходимо больше. На территории Волго-Уральского региона температура окружающей среды в течение года может меняться от –45 до +40 °С, что может отразиться на эффективности работы компрессора.

Моделированием работы компрессоров занималось множество авторов [8–21]. В работе [9] показано, что с ростом перепада давления коэффициент полезного действия компрессора снижается в связи с ростом энергии, потраченной на сжатие газа, утечками и перетечками газа в процессе сжатия и расширения.

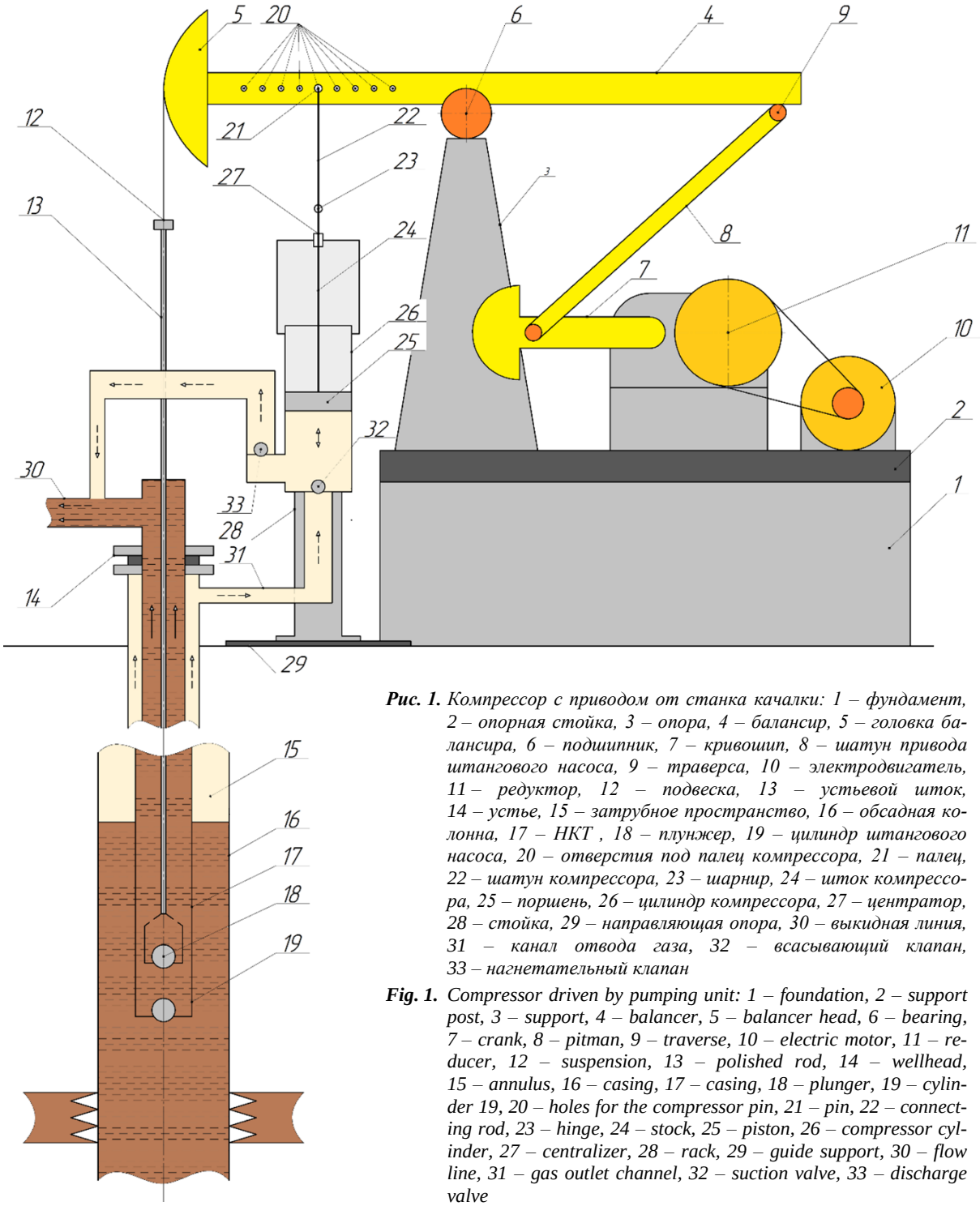



***Рис. 1.*** *Компрессор с приводом от станка качалки: 1 – фундамент, 2 – опорная стойка, 3 – опора, 4 – балансир, 5 – головка балансира, 6 – подшипник, 7 – кривошип, 8 – шатун привода штангового насоса, 9 – траверса, 10 – электродвигатель, 11 – редуктор, 12 – подвеска, 13 – устьевой шток, 14 – устье, 15 – затрубное пространство, 16 – обсадная колонна, 17 – НКТ , 18 – плунжер, 19 – цилиндр штангового насоса, 20 – отверстия под палец компрессора, 21 – палец, 22 – шатун компрессора, 23 – шарнир, 24 – шток компрессора, 25 – поршень, 26 – цилиндр компрессора, 27 – центратор, 28 – стойка, 29 – направляющая опора, 30 – выкидная линия, 31 – канал отвода газа, 32 – всасывающий клапан, 33 – нагнетательный клапан*

***Fig. 1.*** *Compressor driven by pumping unit: 1 – foundation, 2 – support post, 3 – support, 4 – balancer, 5 – balancer head, 6 – bearing, 7 – crank, 8 – pitman, 9 – traverse, 10 – electric motor, 11 – reducer, 12 – suspension, 13 – polished rod, 14 – wellhead, 15 – annulus, 16 – casing, 17 – casing, 18 – plunger, 19 – cylinder 19, 20 – holes for the compressor pin, 21 – pin, 22 – connecting rod, 23 – hinge, 24 – stock, 25 – piston, 26 – compressor cylinder, 27 – centralizer, 28 – rack, 29 – guide support, 30 – flow line, 31 – gas outlet channel, 32 – suction valve, 33 – discharge valve*

В работе [10] экспериментально установлено, что существует возможность сжатия газов до высоких давлений нагнетания в одной длинноходовой ступени до порядка 100 раз при интенсивном охлаждении. В работе [12] показано, что температура внутри компрессора значительно зависит от реализованной системы охлаждения. При жидкостном охлаждении температура внутри компрессора ниже, чем при воздушном.

В работах [11, 12] показано, что упрощенная стационарная модель работы компрессора позволяет с достаточной точностью прогнозировать энергетические характеристики одноступенчатых компрессорных установок. Сравнение результатов моделирования с экспериментальными данными показало точность прогнозирования расхода компрессора на уровне 5 %. В работе [15] показано, что моделирование компрессора с применением пакетов вычислительной гидродинамики (CFD) точнее, чем использование простых математических моделей работы компрессора, однако скорость расчета при этом увеличивается на два порядка, при не существенном увеличении точности модели. В работе [16] была разработана численная модель с учетом течения в трубах и работы пружинных клапанов. Сравнение с экспериментальными данными показало удовлетворительные результаты.

Работа компрессора с приводом от станка-качалки характеризуется длительным циклом сжатия и расширения. Повышение температуры в поршневых компрессорах в основном ограничивается температурой вспышки масла, используемого для смазки цилиндрической части рабочих камер из-за прямого контакта сжимаемого газа и масла. Поэтому в высокоскоростных компрессорах, процесс сжатия которых близок к адиабатическому, и степень повышения давления редко превышает трех–пяти. В работе [14] протестирована эксплуатация «медленных» компрессоров при перекачке различных газов, в том числе при перекачке пропан-бутановых смесей, при этом степень повышения давления составляла до 30 раз.

В работах [19–21] показана возможность нейросетевого моделирования компрессора, причем погрешность такой модели относительно экспериментальных данных в сравнении с физико-математической моделью получилась ниже. Однако для построения нейросетевых моделей необходим большой набор экспериментальных данных.

### Постановка проблемы

Целью данной работы является оценка влияния температуры окружающей среды на производительность компрессора, а также целесообразности установки системы охлаждения.

### Методология

Для достижения поставленной цели была разработана математическая модель работы одноступенчатого устьевого компрессора с приводом от станка-качалки, конструкция которого предложена авторами в работе [22]. Особенностью данного компрессора является возможность регулирования длины хода поршня. Основные уравнения для описания термодинамических процессов в компрессоре определяются с помощью первого начала термодинамики и закона сохранения массы газа в цилиндре компрессора. В математической модели учитывается механическая работа, кинетическая и тепловая энергия. При этом принято допущение, что откачиваемый газ идеальный (свойства газа идентичные свойствам метана).

Динамика работы клапанов не учитывается, поскольку работа компрессора ограничена 5 циклами сжатия в минуту.

Математическая модель работы компрессора описывается следующими уравнениями: уравнение первого начала термодинамики (1), уравнение сохранения массы (2), уравнение состояния (3) и уравнение расхода газа (4).

Первое начало термодинамики запишется в виде:

$$dU = (K \cdot \Delta T - \frac{dV}{dt} P)dt + dm_{in} \cdot h - dm_{out} \cdot h, \quad (1)$$

где $K$ – коэффициент теплопередачи Вт/К; $\Delta T$ – разность между температурой газа и стенками компрессора, К; $\frac{dV}{dt}$ – изменение объема во времени м$^3$/с; $P$ – давление внутри компрессора, Па; $dm_{in}$ – массовый расход поступающего газа, кг; $dm_{out}$ – массовый расход газа, нагнетаемого в напорную линию, кг; $h$ – удельная энтальпия газа, Дж/кг.

Уравнение сохранения массы запишется в виде:

$$dm = dm_{in} + dm_{out}, \quad (2)$$

где $dm$ – масса газа внутри компрессора, кг.

Уравнение состояния:

$$pV = mRT. \quad (3)$$

Закон движения поршня соответствует закону движения точки подвеса насосных штанг на головке балансира станка-качалки, с отличием только в длине хода.

Поскольку скорости движения плунжера маленькие (число циклов сжатия–расширения ≈4 в минуту, изменение скорости происходит плавно по синусоиде), расход газа будет определяться в большей степени скоростью плунжера, а не особенностями течения через клапан. Поэтому в модели уравнение расхода газа определялось для несжимаемой жидкости с учетом коэффициента расширения.

$$dm = \alpha \cdot \varepsilon \cdot f \cdot \sqrt{2 \cdot \rho \cdot \Delta P} \cdot dt. \quad (4)$$

Коэффициент теплопередачи для цилиндрической стенки определялся с учетом площади поверхности внутренней стенки, наружной стенки и стенки изоляции (при наличии). Коэффициент теплопередачи для компрессора с установленным на корпусе радиатором определялся с учетом увеличенной площади поверхности охлаждения.

Коэффициент теплоотдачи от газа к стенкам определялся с помощью зависимостей, представленных в безразмерном виде (с учетом чисел Нуссельта, Рейнольдса и Прандтля) [8].

Схема модели компрессора представлена на рис. 2.

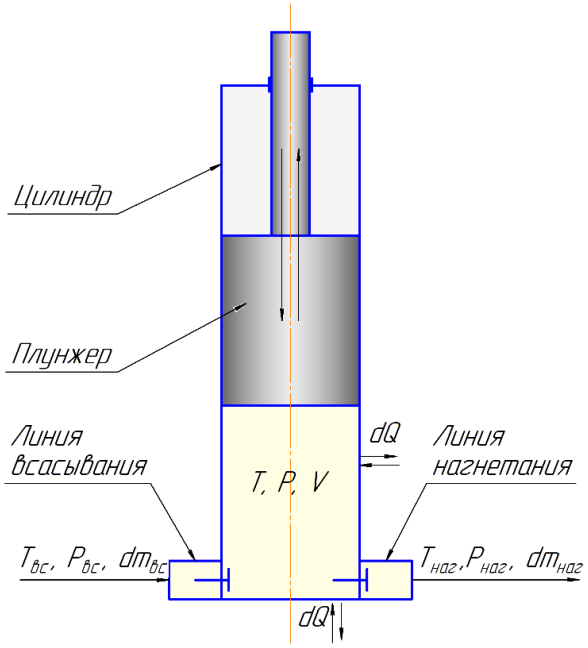



***Рис. 2.*** *Схема модели одноступенчатого компрессора с приводом от станка-качалки*

***Fig. 2.*** *Scheme of a model of a single-stage compressor driven by a pumping unit*

Для построения зависимости массового расхода газа от температуры окружающей среды была поставлена серия численных экспериментов. Численная модель реализована следующим образом: в начальный момент времени зафиксированы значения температуры и давления внутри компрессора, а также положение плунжера. Задавая изменение положения плунжера, согласно закону движения привода штанговой скважинной насосной установки рассчитывается изменение объема и соответственно давления в рабочей камере компрессора. Если давление в камере меньше, чем давление на линии всасывания, то происходит процесс заполнения компрессора газом, при этом рассчитывается его массовый расход, если давление в камере больше, чем давление на линии нагнетания, то рассчитывается массовый расход газа в линию нагнетания. После определения параметров теплоотдачи от стенок компрессора рассчитывается изменение внутренней энергии, температуры и давления внутри компрессора, затем цикл повторяется. Температура варьировалась от –45 до +45 °С. Давление на приеме варьировалось от 2 до 8 атм. Аналогичная серия была произведена с компрессором, оснащенным радиатором охлаждения. Отличием модели с радиатором заключается в наличии радиаторных пластин, увеличивающих поверхность теплоотдачи.

Основные параметры для моделирования были следующие: коэффициент теплопередачи стали – 30; коэффициент теплопередачи теплоизоляции – 0,5; коэффициент соотношения площади оребрения к площади цилиндра компрессора – в диапазоне от 5 до 15; толщина изоляции – от 0,01 до 0,1 м; показатель адиабаты – 1,3; температура на входе в компрессор – 20 °С; температура окружающей среды – в диапазоне от –45 до +45 °С; давление на входе в компрессор – от 200000 до 1900000 Па; площадь проходного сечения клапанов – 0,0008 м$^2$; коэффициент расхода клапана – 0,8; плотность газа на входе – 2,2 кг/ м$^3$; давление на выкиде – 2000000 Па; диаметр поршня – 0,095 м; толщина корпуса – 0,0055 м; длина хода – 1 м; объем мертвого пространства – 0,003 м$^3$; молярная масса метана – 0,016 кг/моль.

Во всех полученных результатах массовый расход газа определялся как поступающий на вход компрессора, в то же время нами оценивался и массовый расход газа на выкиде компрессора.

**Обсуждение**

Результаты численного моделирования показали, что с ростом температуры окружающей среды снижается производительность компрессора, с ростом давления на приеме производительность компрессора увеличивается. Например, при давлении 1900000 (перепад давления 100000 Па) производительность компрессора при температуре 228 К больше на 7 %, чем при температуре 318 К. При этом для температуры 273 К производительность компрессора при давлении на приеме 1900000 Па в 64 раза больше, чем при давлении на приеме 200000 Па.

Численное моделирование показало, что при уменьшении температуры окружающей среды увеличивается промежуток времени, в течении которого происходит как нагнетание, так и всасывание газа (рис. 4). Аналогичные изменения наблюдаются при увеличении давления на приеме (рис. 5).

При росте температуры окружающей среды увеличивается средняя температура внутри компрессора. Возрастание средней температуры внутри рабочей камеры компрессора приводит к тому, что давление внутри рабочей камеры компрессора при увеличении объема камеры достигает значений давления всасывания при больших значениях объема камер. Поэтому время всасывания и соответственно объем всасываемого газа получаются меньше (рис. 3, *а–в*, красная линия). За счет снижения объема всасываемого газа уменьшается объем нагнетаемого газа (рис. 3, *а–в*, оранжевая линия) и массовый расход газа через компрессор соответственно.

При уменьшении давления на приеме компрессора время, необходимое на изменение давления в камере от значения давления всасывания до давления нагнетания и наоборот, увеличивается. Поэтому линия всасывания и нагнетания становятся меньше, как и производительность компрессора. Если производительность компрессора окажется недостаточной для снижения давления в затрубном пространстве скважины, то эффекта от установки компрессора не будет. С другой стороны, если производительность компрессора окажется значительно больше необходимого, то коэффициент полезного действия работы компрессора окажется низким.

На рис. 4 показано влияние перепада давления на максимальные температуры, возникающие при работе компрессора.

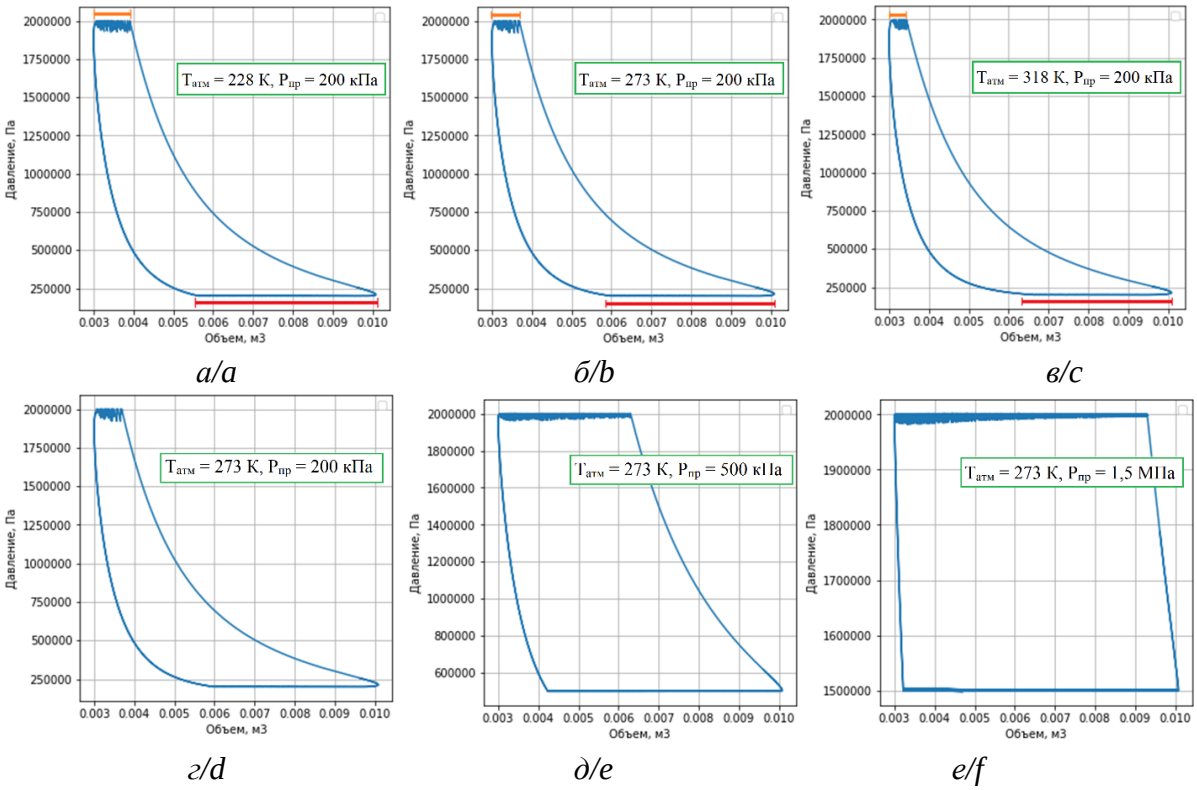



***Рис. 3.*** *Зависимости давления газа от объема пространства в рабочей камере при различных температурах окружающей среды (а, б, в) и давлении газа на приеме (г, д, е)*

***Fig. 3.*** *Gas pressure versus volume of space in the working chamber at different ambient temperatures (a, b, c) and intake pressure (d, e, f)*

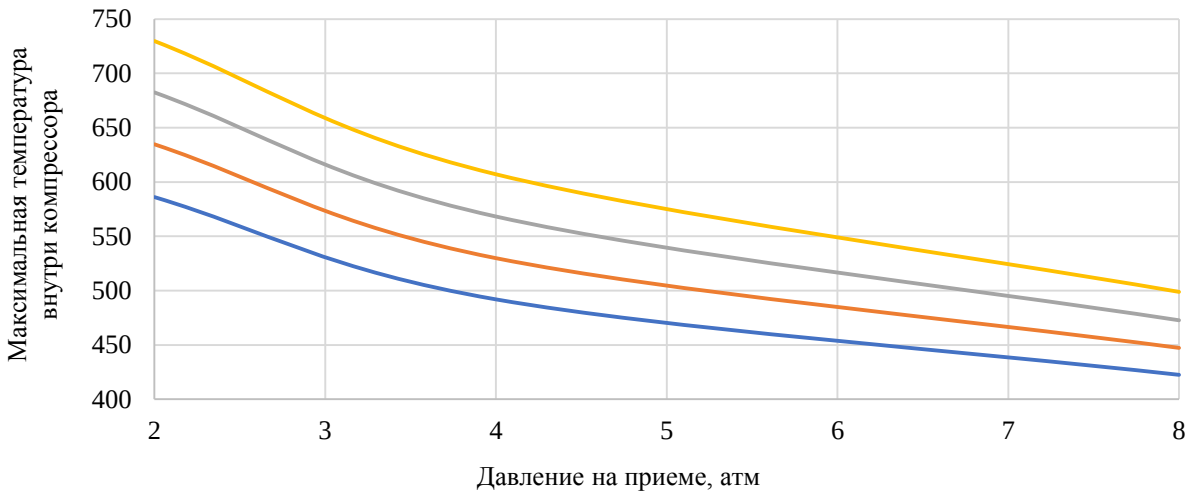



***Рис. 4.*** *Влияние давления на приеме на максимальную температуру внутри компрессора*

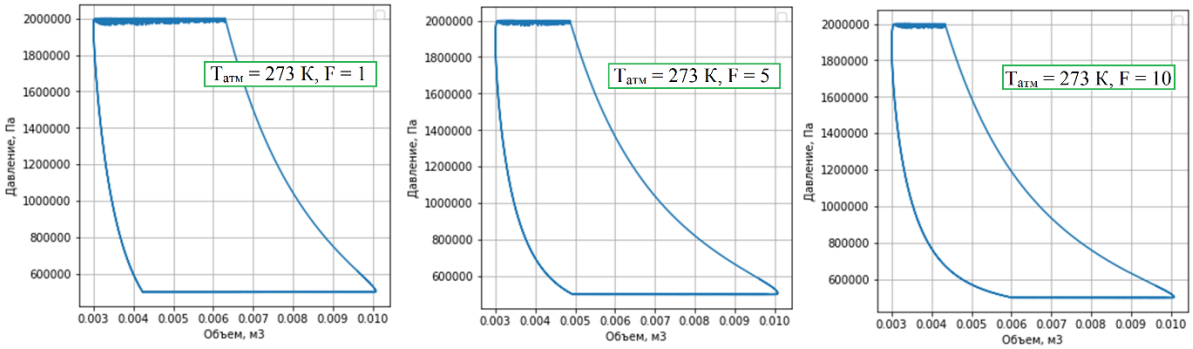
***Fig. 4.*** *Influence of intake pressure on the maximum temperature inside the compressor*

Температура окружающей среды значимо влияет на эффективность работы компрессора. С ростом температуры окружающей среды массовый расход газа через компрессор снижается.

С ростом температуры окружающей среды увеличивается и максимальная температура, возникающая при работе компрессора. Это в свою очередь уменьшает эффективность работы компрессора, а также приводит к необходимости применения масел с высокими температурами вспышки. Кроме того, видно, что при уменьшении давления на приеме компрессора значения температур, возникающих в процессе работы компрессора, растут, а количество всасываемого газа уменьшается.

На рис. 5 показано влияние охлаждения на работу компрессора. С увеличением площади поверхности оребрения (с ростом F) уменьшается промежуток времени, при котором происходит как всасывание, так и нагнетание. Объясняется это тем, что при увеличении объема рабочей камеры происходит сниже-

ние давления газа внутри нее, при этом уменьшается и температура газа, однако наличие оребрения приводит к тому, что в процессе охлаждения компрессора легче поглощается теплота из окружающей среды (при достижении значения температуры внутри компрессора меньше температуры окружающей среды).

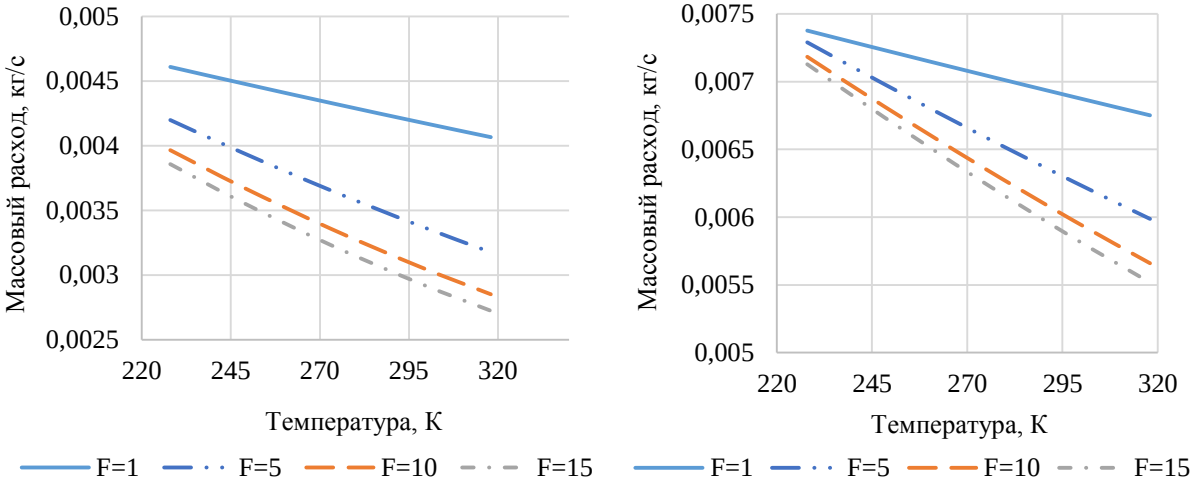



*а/a* *б/b* *в/c*

***Рис. 5.*** *Зависимости давления газа от объема пространства в рабочей камере при различном соотношении F (площади радиатора к площади цилиндра) и давлении на приеме равном 500000*

***Fig. 5.*** *Dependences of gas pressure on the volume of space in the working chamber with a different ratio of F (radiator area to cylinder area) and intake pressure equal to 500000*

На рис. 6 показаны зависимости массового расхода газа от температуры окружающей среды при различных соотношениях F. При увеличении давления на приеме разница между массовым расходом при установленном радиаторе и без минимизируется, особенно при низких температурах окружающей среды.




*а/a* *б/b*

***Рис. 6.*** *Зависимость массового расхода газа от температуры окружающей среды при различных соотношениях F (площади радиатора к площади цилиндра) и давлении на приеме равном 1000000 (а) и 1500000 (б)*

***Fig. 6.*** *Dependence of gas mass flow rate on ambient temperature at various ratios F (radiator area to cylinder area) and intake pressure equal to 1000000 (a) and 1500000 (b)*

Серией численных экспериментов был проведен анализ влияния толщины изоляции на массовый расход газа. С увеличением толщины изоляции с 1 до 10 см, при высоких значениях давления на приеме (1–1,5 МПа), производительность растет незначительно. При низких значениях давления на приеме (0,2–0,5 МПа) производительность компрессора увеличивается на 10–30 %.

На рис. 7 показано сравнение значений массового расхода компрессора в различных конфигурациях (с радиатором F=5…15, с изоляцией S=0,01...0,1 м и без устройств F=1).

Наибольший расход газа наблюдается при установке теплоизоляции.

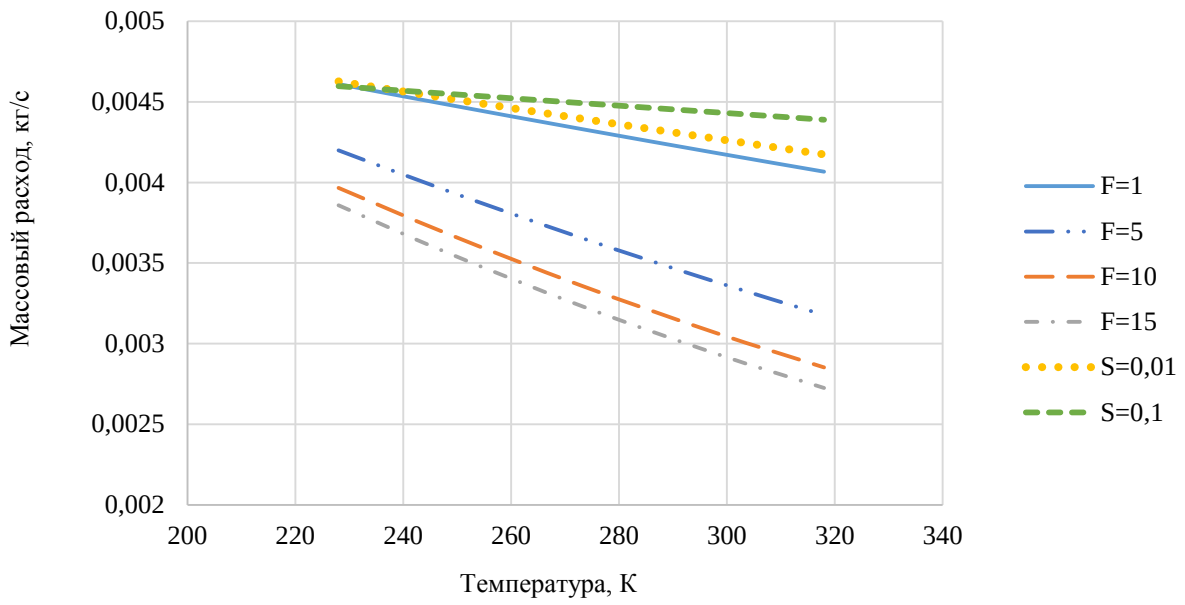



***Рис. 7.*** *Зависимость массового расхода газа от температуры окружающей среды при различной толщине изоляции (S=0,1 и S=0,01), без изоляции (F=1) и при различных характеристиках охлаждения (F=5, F=10, F=15). Давление на приеме равно 1000000 Па*

***Fig. 7.*** *Dependence of the mass flow rate of gas on the ambient temperature for different thicknesses of insulation (S=0,1 and S=0,01), without insulation (F=1) and with different cooling characteristics (F=5, F=10, F=15). The intake pressure is 1000000 Pa*

### Научные и практические результаты

Анализ тепловых процессов, возникающих при работе устьевого компрессора, показал значимый эффект влияния температуры окружающей среды на производительность компрессора. При низких температурах производительность компрессора выше, чем при высоких. Это следует учитывать при конструировании устьевых компрессоров и регулировании режима их работы. Например, можно сделать сменной длину хода компрессора для режима зимы и лета.

Установка радиатора негативно сказалась на производительности компрессора, особенно при низких давлениях на приеме. Установка теплоизоляции напротив позволила несколько увеличить производительность компрессора, но не значительно.

Основным фактором, влияюшим на производительность компрессора, является давление на приеме (величина перепада давления), поэтому в начальный период работы компрессора, когда давление на приеме приближается к линейному давлению в трубопроводе, производительность компрессора высока. Постепенно, со снижением затрубного давления, производительность компрессора будет падать, поэтому значительного снижения затрубного давления можно не добиться. В дальнейших исследованиях необходимо оценить, на какую величину можно снизить затрубное давление газа.

На основе разработанной математической модели компрессора предлагается разработка информационной системы, определяющей необходимую длину хода поршня для различных условий эксплуатации (летнего и зимнего) путем изменения положения пальца компрессора на балансире (рис. 1), а также рекомендующей установку съемной теплоизоляции.

### Заключение

Анализ теплового режима работы устьевого компрессора показал значимый эффект температуры окружающей среды (от –45 до +45 °С) на производительность компрессора. При низких значениях температуры его подача выше, чем при высоких. Установка радиатора оказала негативное влияние на производительность компрессора, особенно при низких значениях давления на приеме, а установка теплоизоляции напротив незначительно ее повысила. Основным фактором, влияющим на рабочую характеристику компрессора, является давление на приеме (величина перепада давления), поэтому в начальный период работы компрессора, когда давление на приеме приближается к линейному давлению в трубопроводе, производительность компрессора наиболее высока. Полученные результаты свидетельствуют о необходимости разработки автоматизированной системы подбора параметров эксплуатации компрессора, учитывающей в том числе значение температуры окружающей среды для обеспечения повышения эффективности работы компрессорной установки.

### СПИСОК ЛИТЕРАТУРЫ

1. Носков А.Б., Косилов Д.А. Промысловые испытания технологии компании «ВЕТЭК», направленной на увеличение производительности механизированного фонда скважин // Оборудование и технологии для нефтегазового комплекса. – 2013. – № 6. – С. 76–80.
2. Уразаков К.Р., Минликаев В.З., Баймухаметов Т.К. Область применения и подбор компрессоров для откачки газа из за-

трубного пространства насосных скважин. Деп. Во ВИНИТИ от 15.02.99 № 485-В99. – Уфа: Башнипинефть, 1999. – 10 с.
3. Колесова С.Б., Насыров А.М., Полозов М.Б. Снижение влияния свободного газа на работу насосного оборудования // Экспозиция Нефть Газ. – 2018. – № 6 (66). – С. 48–50.
4. Севастьянов А.В., Иванов А.А., Фаткуллин А.С. Технология отвода газа из затрубного пространства нефтяных скважин // Нефтепромысловое дело. – 2014. – № 9. – С. 30–31.
5. Разработка конструкции подвесного компрессора с гидрозатвором для нефтяной скважины / А.В. Севастьянов, Ш.Г. Мингулов, Ю.В. Нигай, М.Д. Валеев, Р.С. Третьяков // Оборудование и технологии для нефтегазового комплекса. – 2016. – № 3. – С. 27–32.
6. Комплексный подход к снижению влияния попутного нефтяного газа на эффективность работы штанговых насосных установок / С.Г. Зубаиров, К.Р. Уразаков, А.М. Азизов, Р.В. Усманов // Нефтегазовое дело. – 2019. – Т. 17. – № 3. – С. 106–112.
7. Уразаков К.Р., Андреев В.В., Жулаев В.П. Нефтепромысловое оборудование для кустовых скважин. – М.: Недра, 1999. – 268 с.
8. Хрусталев Б.С. Математическое моделирование рабочих процессов в объемных компрессорах для решения задач автоматизированного проектирования: дис. ... д-ра техн. наук. – СПб., 1999. – 269 с.
9. Влияние отношения давления нагнетания к давлению всасывания компрессорной полости на характеристики поршневого насос-компрессора / Е.А. Павлюченко, М.П. Алтынцев, Г.С. Аверьянов, В.И. Суриков, В.С. Виниченко // Омский научный вестник. – 2012. – № 1. – С. 133–135.
10. Экспериментальные исследования одноступенчатого поршневого компрессора при сжатии воздуха до высоких давлений / А.В. Недовенчаный, В.К. Васильев, И.Ф. Минуров, И.М. Козьмин // Техника и технология нефтехимического и нефтегазового производства: Материалы 8-й международной научно-технической конференции. – Омск: Омский государственный технический университет, 2018. – С. 105–106.
11. Cabello R., Navarro J., Torrella E. Simplified steady-state modelling of a single stage vapour compression plant. Model development and validation // Applied thermal engineering. – 2005. – V. 25. – № 11–12. – P. 1740–1752. URL: https://doi.org/10.1016/j.applthermaleng.2004.10.012 (дата обращения 15.11.2021).
12. Analysis of the variation mechanism in the main energetic parameters in a single-stage vapour compression plant / R. Cabello, J. Navarro, R. Llopis, E. Torrella //Applied thermal engineering. – 2007. – V. 27. – № 1. – P. 167–176.
13. The experimental research of the thermal conditions in slow speed stage of air reciprocating compressor / V.L. Yusha, S.S. Busarov, R.Yu. Goshlya, A.V. Nedovenchanyi, B.S. Sazhin, M.A. Chizhikov, I.S. Busarov // Procedia Engineering. – 2016. – V. 152. – P. 297–302. URL: https://doi.org/10.1016/j.proeng.2016.07.706 (дата обращения 15.11.2021).
14. Theoretical evaluation of the efficiency of gas single-stage reciprocating compressor medium pressure units / S.S. Busarov, V.K. Vasil'ev, I.S. Busarov, D.S. Titov, Ju.N. Panin // AIP Conference Proceedings. – Omsk: AIP Publ., 2017. – V. 1876. – № 1. – P. 020037. URL: https://doi.org/10.1063/1.4998857 (дата обращения 15.11.2021).
15. Numerical analysis of a hermetic reciprocating compressor oil pump system / S. Poscha, J. Hopfgartnera, E. Bergera, B. Zubera, P. Schöllaufb, R. Almbauera // International journal of refrigeration. – 2018. – V. 85. – P. 135–143. URL: https://doi.org/10.1016/j.ijrefrig.2017.09.017 (дата обращения 15.11.2021).
16. Object-oriented simulation of reciprocating compressors: numerical verification and experimental comparison / R. Damle, J. Rigola, C.D. Pérez-Segarra, J. Castro, A. Oliva // International journal of refrigeration. – 2011. – V. 34. – № 8. – P. 1989–1998. URL: https://doi.org/10.1016/j.ijrefrig.2011.02.006 (дата обращения 15.11.2021).
17. Braga V.M., Barbosa Jr J.R., Deschamps C.J. Numerical investigation of refrigerant outgassing in the screw pump of a hermetic reciprocating compressor oil supply system // Proc. of the Institution of Mechanical Engineers, Part E: Journal of Process Mechanical Engineering. – 2019. – V. 604. – № 011009. – P. 0954408920952609.
18. Quality prediction of plunger components based on the finite element method during the neck-spinning process / Y. Wang, H. Su, G. Lu, J. Dai, B. Zhao, Ch. Dai, Y. Fu // The International Journal of Advanced Manufacturing Technology. – 2020. – V. 106. – № 3. – P. 1509–1520.
19. Development of an automated compressor performance mapping using artificial neural network and multiple compressor technologies / J. Ma, X. Ding, W. Travis Horton, D. Ziviani // International Journal of Refrigeration. – 2020. – V. 120. – P. 66–80.
20. A comparison between the modeling of a reciprocating compressor using artificial neural network and physical model / J.M. Belman-Flores, S. Ledesma, J.M. Barroso-Maldonado, J. Navarro-Esbrí // International Journal of Refrigeration. – 2015. – V. 59. – P. 144–156.
21. Hu J., Shao L.-L., Zhang Ch.-L. Generic network modeling of reciprocating compressors // International journal of refrigeration. – 2014. – V. 45. – P. 107–119.
22. Устройство для откачки газа из затрубного пространства: пат. № 2726720 Российская Федерация. МПК E21B 43/00. заявл. 10.01.2020; опубл. 15.07.2020. – Бюл. № 20. – 11 с.

*Поступила 23.12.2021 г.*

**Информация об авторах**

***Уразаков К.Р.,*** доктор технических наук, профессор кафедры машин и оборудования нефтегазовых промыслов, Уфимский государственный нефтяной технический университет.

***Латыпов Б.М.*** кандидат технических наук, доцент кафедры машин и оборудования нефтегазовых промыслов, Уфимский государственный нефтяной технический университет.

***Белозеров В.В.***, аспирант кафедры машин и оборудования нефтегазовых промыслов, Уфимский государственный нефтяной технический университет.

UDC 622.276.53.054.4

# TEMPERATURE REGIME OF A WELLHEAD COMPRESSOR FOR PUMPING GAS FROM THE ANNULUS OF AN OIL WELL

**Kamil R. Urazakov[1],**
urazakk@mail.ru

**Bulat M. Latypov[1],**
bulatti@hotmail.com

**Victor V. Belozerov[1],**
belozerovvv51@list.com

[1] Ufa State Petroleum technological university,
1, Kosmonavtov street, Ufa, 450062, Russia.

***The relevance*** *of the study is caused by the need to reduce the annular gas pressure in oil wells equipped with sucker rod pumping units at high reservoir pressures and the prospective use of wellhead compressors to solve this problem. The operating conditions of the compressors and their operating modes are described.*
***The purpose*** *of the work is to assess the effect of ambient temperature on compressor performance, as well as the advisability of installing a cooling system or thermal insulation.*
***Methods:*** *physical and mathematical model of a single-stage wellhead compressor driven by a pumping unit; the basic equations for describing thermodynamic processes in a compressor are described using the first law of thermodynamics and the law of conservation of gas mass in the compressor cylinder. The developed model takes into account mechanical work, kinetic and thermal energy. At the same time, it is assumed that the pumped gas is ideal. The mathematical model of the compressor operation is implemented in the Python programming language.*
***Results.*** *Analysis of the influence of thermal processes on the wellhead compressor operation showed a significant effect of the ambient temperature on the compressor performance. Based on the results of calculations, it was found that at low temperatures, the compressor performance is higher than at high temperatures. Installing a radiator has a negative impact on compressor performance, especially at low intake pressures. Installation of thermal insulation, on the other hand, made it possible to slightly increase the compressor performance, but not significantly. The main factor affecting the compressor performance is the intake pressure (the value of the pressure drop), therefore, at the compressor start, when the intake pressure approaches the line pressure in the pipeline, the compressor performance is high.*

***Key words:***
*Sucker rod pump, wellhead compressor, temperature conditions, compressor performance, pumping unit.*

## REFERENCES

1. Noskov A.B., Kosilov D.A. Promyslovye ispytaniya tekhnologii kompanii «VETEK», napravlennoy na uvelichenie proizvoditelnosti mekhanizirovannogo fonda skvazhin [Field trials of the VETEK company technology aimed at increasing the productivity of the mechanized well stock]. *Oborudovanie i tekhnologii dlya neftegazovogo kompleksa*, 2013, no. 6, pp. 76–80.
2. Urazakov K.R., Minlikaev V.Z., Baymuhametov T.K. *Oblast primeneniya i podbor kompressorov dlya otkachki gaza iz zatrubnogo prostranstva nasosnyh skvazhin* [Scope and selection of compressors for pumping gas from the annular space of pumping wells]. Dep. Vo VINITI ot 15.02.99 no. 485-V99. Ufa, Bashnipineft Publ., 1999. 10 p.
3. Kolesova S.B., Nasyrov A.M., Polozov M.B. Reducing the effect of free gas on the operation of pumping equipment. *Exposition Oil Gas*, 2018, no. 6 (66), pp. 48–50. In Rus.
4. Sevastyanov A.V., Ivanov A.A., Fatkullin A.S. Tekhnologiya otvoda gaza iz zatrubnogo prostranstva neftyanykh skvazhin [Technology of gas removal from the annular space of oil wells]. *Nefteprom yslovoe delo*, 2014, no. 9, pp. 30–31.
5. Sevastyanov A.V., Mingulov Sh.G., Nigay Yu.V., Valeev M.D., Tretyakov R.S. Razrabotka konstruktsii podvesnogo kompressora s gidrozatvorom dlya neftyanoy skvazhiny [Development of the design of an outboard compressor with a hydraulic seal for an oil well]. *Oborudovanie i tekhnologii dlya neftegazovogo kompleksa*, 2016, no. 3, pp. 27–32.
6. Zubairov S.G., Urazakov K.R., Azizov A.M., Usmanov R.V. Complex approach to reducing the impact of associated petroleum gas on the efficiency of sucker rod pumping units. *Oil and gas business*, 2019, vol. 17, no. 3, pp. 106–112. In Rus.
7. Urazakov K.R., Andreev V.V., Zhulaev V.P. *Neftepromyslovoe oborudovanie dlya kustovykh skvazhin* [Oilfield equipment for cluster wells]. Moscow, Nedra Publ., 1999. 268 p.
8. Khrustalev B.S. *Matematicheskoe modelirovanie rabochikh protsessov v obemnykh kompressorakh dlya resheniya zadach avtomatizirovannogo proektirovaniya*. Dis. Dokt. nauk [Mathematical modeling of working processes in volumetric compressors for solving problems of computer-aided design. Dr. Diss]. St-Petersburg, 1999. 269 p.
9. Pavlyuchenko E.A., Altyntsev M.P., Aver'yanov G.S., Surikov V.I., Vinichenko V.S. Vliyanie otnosheniya davleniya nagnetaniya k davleniyu vsasyvaniya kompressornoy polosti na kharakteristiki porshnevogo nasos-kompressora [Influence of the ratio of the discharge pressure to the suction pressure of the compressor cavity on the characteristics of the piston pump-compressor]. *The Journal Omsk Scientific Bulletin*, 2012, no. 1, pp. 133–135.
10. Nedovenchany A.V., Vasilev V.K., Minurov I.F., Kozmin I.M. Eksperimentalnye issledovaniya odnostupenchatogo porshnevogo kompressora pri szhatii vozdukha do vysokikh davleniy [Experimental studies of a single-stage reciprocating compressor with air compression to high pressures]. *Tekhnika i tekhnologiya neftekhimicheskogo i neftegazovogo proizvodstva*, 2018, pp. 108–109.
11. Cabello R., Navarro J., Torrella E. Simplified steady-state modelling of a single stage vapour compression plant. Model development and validation. *Applied thermal engineering*, 2005, vol. 25, no. 11–12, pp. 1740–1752. Available at: https://doi.org/10.1016/j.applthermaleng.2004.10.012 (accessed 15 November 2021).
12. Cabello R., Navarro J., R. Llopis, Torrella E. Analysis of the variation mechanism in the main energetic parameters in a single-stage vapour compression plant. *Applied thermal engineering*, 2007, vol. 27, no. 1, pp. 167–176.

13. Yusha V.L., Busarov S.S., Goshlya R.Yu., Nedovenchanyi A.V., Sazhin B.S., Chizhikov M.A., Busarov I.S. The experimental research of the thermal conditions in slow speed stage of air reciprocating compressor. *Procedia Engineering*, 2016, vol. 152, pp. 297–302. Available at: https://doi.org/10.1016/j.proeng.2016.07.706 (accessed 15 November 2021).
14. Busarov S.S., Vasil'ev V.K., Busarov I.S., Titov D.S., Panin Ju.N. Theoretical evaluation of the efficiency of gas single-stage reciprocating compressor medium pressure units. AIP Conference Proceedings. Omsk, AIP Publ., 2017. Vol. 1876, no. 1, pp. 020037. Available at: https://doi.org/10.1063/1.4998857 (accessed 15 November 2021).
15. Posch S., Hopfgartnera J., Bergera E., Zubera B., Schöllaufb P., Almbauera R. Numerical analysis of a hermetic reciprocating compressor oil pump system. *International journal of refrigeration*, 2018, vol. 85, pp. 135–143. Available at: https://doi.org/10.1016/j.ijrefrig.2017.09.017 (accessed 15 November 2021).
16. Damle R., Rigola J., Pérez-Segarra C.D., Castro J., Oliva A. Object-oriented simulation of reciprocating compressors: Numerical verification and experimental comparison. *International journal of refrigeration*, 2011, vol. 34, no. 8, pp. 1989–1998. Available at: https://doi.org/10.1016/j.ijrefrig.2011.02.006 (accessed 15 November 2021).
17. Braga V.M., Barbosa Jr J.R., Deschamps C.J. Numerical investigation of refrigerant outgassing in the screw pump of a hermetic reciprocating compressor oil supply system. *Proc. of the Institution of Mechanical Engineers, Part E: Journal of Process Mechanical Engineering*, 2019, vol. 604 no. 011009, pp. 0954408920952609.
18. Wang Y., Su H., Lu G., Dai J., Zhao B., Dai Ch., Fu Y. Quality prediction of plunger components based on the finite element method during the neck-spinning process. *The International Journal of Advanced Manufacturing Technology*, 2020, vol. 106, no. 3, pp. 1509–1520.
19. Ma J., Ding X., Travis Horton W., Ziviani D. Development of an automated compressor performance mapping using artificial neural network and multiple compressor technologies. *International Journal of Refrigeration*, 2020, vol. 120, pp. 66–80.
20. Belman-Flores J.M., Ledesma S., Barroso-Maldonado J.M., Navarro-Esbrí J. A comparison between the modeling of a reciprocating compressor using artificial neural network and physical model. *International Journal of Refrigeration*, 2015, vol. 59, pp. 144–156.
21. Hu J., Shao L.-L., Zhang Ch.-L. Generic network modeling of reciprocating compressors. *International journal of refrigeration*, 2014, vol. 45, pp. 107–119.
22. Urazakov K.R. *Ustroystvo dlya otkachki gaza iz zatrubnogo prostranstva* [Device for pumping gas from the annular space]. Patent RF no. 2726720, 2020.

*Received: 23 December 2021.*

**Information about the authors**

***Urazakov K.R.***, Dr. Sc., professor, Ufa State Petroleum technological university.

***Latypov B.M.***, Cand. Sc., associate professor, Ufa State Petroleum technological university.

***Belozerov V.V.***, postgraduate student Ufa State Petroleum technological university.

УДК 504.062.4:332.142.6: 631.42

# ОЦЕНКА ОСТАТОЧНОГО ЗАГРЯЗНЕНИЯ НА БУРОВЫХ ПЛОЩАДКАХ РОСТОВЦЕВСКОГО МЕСТОРОЖДЕНИЯ

**Тимшанов Рустам Ильясович**[1],
TimshanovRI@ipgg.sbras.ru

**Колесников Роман Александрович**[2],
roman387@mail.ru

**Моргун Евгения Николаевна**[2],
morgun148@gmail.com

**Еделев Алексей Викторович**[1],
EdelevAV@ipgg.sbras.ru

**Юркевич Наталия Викторовна**[1],
YurkevichNV@ipgg.sbras.ru

**Кулешова Татьяна Алексеевна**[1],
KuleshovaTA@ipgg.sbras.ru

[1] Институт нефтегазовой геологии и геофизики им. А.А. Трофимука СО РАН,
Россия, 630090, г. Новосибирск, пр. Академика Коптюга, 3.

[2] ГКУ ЯНАО «Научный центр изучения Арктики»,
Россия, 629008, г. Салехард, ул. Республики, 20.

***Актуальность*** *исследования обусловлена длительным воздействием на объекты окружающей среды (в частности почвы) площадок геологоразведочных скважин, пробуренных в 80–90-х гг. XX в. на территории континентальной части российской Арктики. Устойчивость загрязнения обусловлена прежде всего низкой способностью северных экосистем к самоочищению. Оценка экологической опасности загрязненных грунтов и производственно-хозяйственных отходов на примере Ростовцевского месторождения позволит рассмотреть возможность реализации мер по восстановлению компонентов экосистемы.*
***Цель*** *работы заключается в оценке современного состояния почвенного покрова на Ростовцевском месторождении углеводородов.*
***Объект:*** *территория в районе 25 скважин Ростовцевского месторождения углеводородов (полуостров Ямал, ЯНАО), пробуренных в период с 1986 по 1989 гг.*
***Методы.*** *Комплекс исследований включал отбор и лабораторный анализ 103 проб фоновых и загрязненных почв из верхнего (0–10 см) и нижнего (10–20 см) горизонтов. Особое внимание уделялось изучению анионно-катионного состава, содержания металлов, нефтепродуктов, фенолов, анионных поверхностно-активных веществ.*
***Результаты.*** *Установлен факт прямого загрязнения почв нефтепродуктами, сульфатом бария, цинком, свинцом и другими металлами. Кроме этого, антропогенное воздействие привело к подавлению естественных неоднородностей геохимического поля и формированию однородной приповерхностной физико-химической обстановки. В пределах почвенного слоя отмечается перераспределение соединений и элементов, содержание которых либо не изменилось (анионные поверхностно-активные вещества, мышьяк), либо заметно снизилось (хлорид-ион, обменный аммоний). По суммарному показателю загрязнения вблизи 23 из 25 исследованных буровых площадок содержание вредных веществ охарактеризовано как чрезвычайно опасное. Основной вклад в суммарный показатель загрязнения вносят нефтепродукты.*

***Ключевые слова:***
*Остаточное загрязнение углеводородами, экология, антропогенное воздействие, естественное геохимическое поле, буровые площадки, нефтепродукты в почве, восстановление арктических экосистем.*

## Введение

Начиная со второй половины XX в. одним из главных направлений освоения арктических территорий являлось развитие добывающей промышленности [1–3]. Поиск, разведка и разработка месторождений неизбежно приводили к образованию отходов, а отсутствие системного подхода к их утилизации и низкая способность северных экосистем к самоочищению выразились в накопленном загрязнении окружающей среды [4–6]. Проблемы добычи полезных ископаемых в целом возникают из-за пагубного экологического и социального воздействия и их совокупного влияния на социально-экологические системы [7]. Оценка масштабов остаточного загрязнения с целью разработки эффективных способов восстановления загрязненных территорий является в настоящий момент актуальной задачей. Основными гидрохимическими показателями, в максимальной степени отражающими качественные признаки вод, являются органические вещества и ионно-солевой состав [8, 9]. Химический состав водных экосистем зависит от слагающих пород, климата, количества и формы растворенных веществ, а также множества иных факторов [10]. Арктические регионы являются особо уязвимыми к повышению содержаний металлов в окружающей среде в силу низкого уровня энерго- и массообменов в холодных широтах [11, 12].


DOI 10.18799/24131830/2022/1/3094

### Объект исследования

Ростовцевское нефтегазоконденсатное месторождение было открыто в середине 80-х гг. XX в. Расположено оно в южной части полуострова Ямал. В период с 1986 по 1989 гг. было пробурено более двадцати поисковых и разведочных скважин. В связи со сложной политической и экономической ситуацией в стране по завершению этих работ не выполнялись даже примитивные природоохранные мероприятия, околоскважинные производственные площадки до настоящего времени остаются захламленными различными производственно-хозяйственными отходами (остатками бурового оборудования, автотракторной техники, емкостями, химреагентами, цементом, остовами электролиний и прочими производственными и бытовыми отходами).

Оценка опасности загрязненных земель и производственно-хозяйственных отходов для окружающей среды на площади Ростовцевского месторождения позволит на примере этого объекта оценить возможность реализации мер по восстановлению компонентов экосистемы.

### Методы

#### Отбор проб

В ходе работы экспедиционного отряда с 16 по 29 июля 2019 г. были отобраны образцы фоновых и антропогенно измененных почв в районе 25 скважин Ростовцевского месторождения углеводородов (рис. 1, 2).

Отбор проб почвы проводился в соответствии с действующими нормативными документами: ГОСТ 17.4.3.01-2017, ГОСТ 17.4.4.02-2017, ГОСТ 28168-89, ГОСТ Р. 53123-2008. В районе каждой скважины было взято по пять точечных проб, расположенных по методу конверта в зоне, подвергшейся антропогенному воздействию, в радиусе 10–50 м от скважины. Точечные пробы отбирались с двух почвенных горизонтов (5–10 и 10–20 см). Соответственно были сформированы две объединенные пробы, каждая массой около 1 кг, с верхнего и нижнего почвенных горизонтов. На трёх объектах (в районе скважин №№ 68, 81 и 94) в местах, где были замечены явно выраженные загрязнения почвы нефтепродуктами, были взяты пробы из верхнего горизонта (0–10 см) массой около 1 кг. В целях определения фоновых характеристик территории, соответствующих естественному состоянию природных ландшафтов, было отобрано по два почвенных образца, с глубины 5–10 и 10–20 см весом 1,0…1,1 кг на расстоянии 100–1000 м от границы участков, подвергшихся антропогенному воздействию. Отобранные пробы почв (всего 103 шт.) герметично упаковывались в полиэтиленовые пакеты с маркировкой наименования и номера объекта, номера пробы, глубины опробования. После отбора пробы высушивались в условиях полевого лагеря и лаборатории.

#### Лабораторные исследования

Выполнены лабораторно-аналитические исследования предоставленных проб по методикам измерений, аттестованным в соответствии с ГОСТ Р 8.563. Проведен химический анализ точечных, групповых и специальных проб почв на следующие показатели: pH водной вытяжки (потенциометрический метод по ГОСТ 26423-85), нитрат-ион, фосфат-ион, хлорид-ион, сульфат-ион (хроматографический метод по ПНД Ф 16.1.8-98 [13]), аммоний обменный (фотометрический метод по ГОСТ 26489-85), нефтепродукты (флуориметрический метод по ПНД Ф 16.1:2.21-98 [14]), фенолы летучие (фотометрический метод по ПНД Ф 16.1.2.3:3.44-05 [15]), анионные поверхностно-активные вещества (АПАВ) (экстракционно-фотометрический метод по ПНД Ф 16.1:2:2.2:3.66-10 [16]), валовые формы меди, свинца, цинка, марганца, никеля, хрома, мышьяка, кадмия, бария и ртути методом атомно-абсорбционной спектрометрии (электротермическая атомизация). Основная часть лабораторных исследований выполнена в лаборатории физико-химических методов исследований ИНГГ СО РАН (аттестат аккредитации Ra.Ru.21АЖ28).

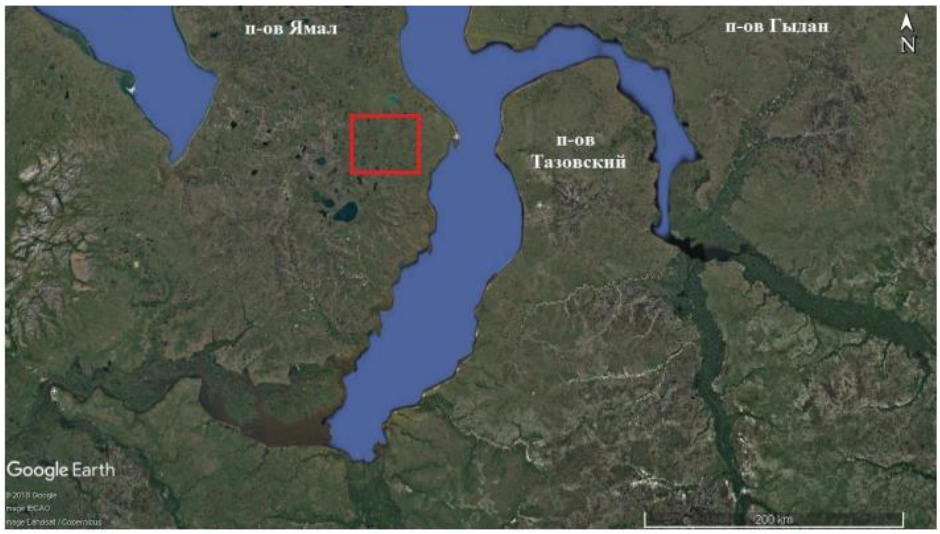



***Рис. 1.*** *Район исследований*
***Fig. 1.*** *Research area*

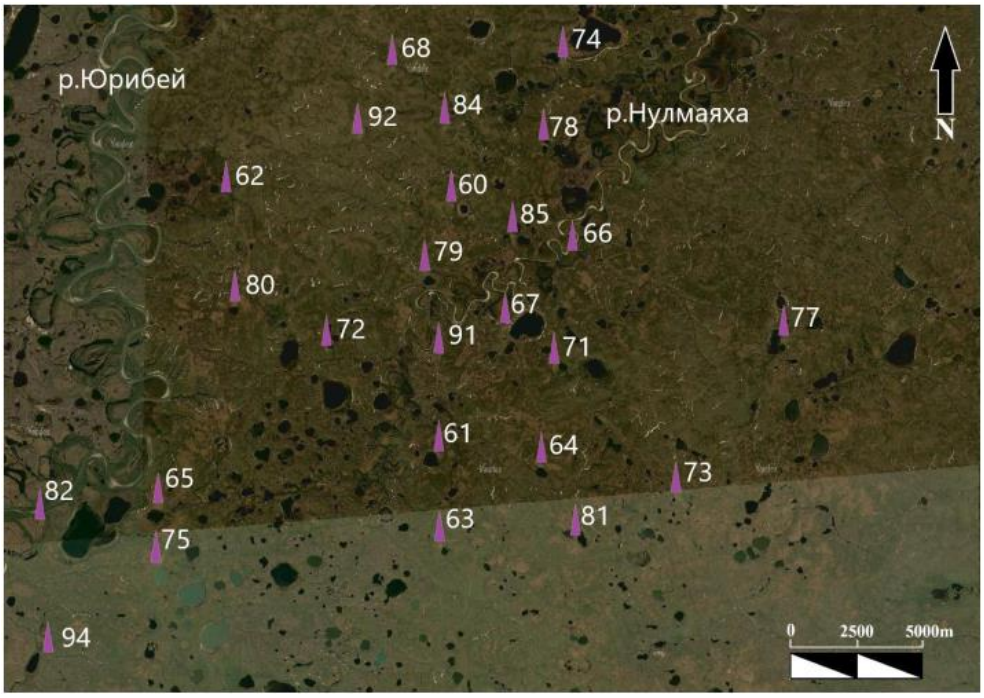



***Рис. 2.*** *Расположение исследованных скважин*
***Fig. 2.*** *Location of surveyed wells*

### Методика оценки экологического состояния

Оценка уровня химического загрязнения почв в данной работе проводилась по показателям:

- *коэффициент концентрации химического вещества* ($К_c$). $К_c$ определяется отношением фактического содержания определяемого вещества в почве ($C_i$) в мг/кг почвы к региональному фоновому ($Сф_i$):

$$К_c = C_i/Сф_i;$$

- *суммарный показатель загрязнения*, который равен сумме коэффициентов концентраций химических элементов-загрязнителей и выражен формулой:

$$Z_c=\sum(Кc_1+\ldots+Кc_n)-(n-1),$$

где $n$ – число определяемых суммируемых веществ; $Кc_i$ – коэффициент концентрации $i$-го компонента загрязнения.

Далее по ориентировочной оценочной шкале опасности загрязнения почв оценивается категория загрязнения почв по МУ 2.1.7.730-99 [17].

***Таблица 1.*** *Оценочная шкала опасности загрязнения почв по суммарному показателю загрязнения $Z_c$*
***Table 1.*** *Evaluation scale of soil pollution hazard according to the total pollution indicator $Z_c$*

| Категория загрязнения почв<br>Soil pollution category | Суммарный показатель загрязнения<br>Total pollution indicator |
|---|---|
| Допустимая/Permissible | менее 16/less than 16 |
| Умеренно опасная<br>Moderately dangerous | 16–32 |
| Опасная/Dangerous | 32–128 |
| Чрезвычайно опасная<br>Extremely dangerous | более 128/more than 128 |

## Результаты и обсуждение

### Физико-химические параметры проб почвы. Основной анионный состав

Почвы как объект экологического мониторинга обладают рядом качеств. Одно из них, обусловленное присутствием таких соединений, как алюмосиликаты, гидроксиды, гуминовые и фульво-кислоты и др., – это депонирование попавших в почву загрязняющих веществ. С одной стороны, это затрудняет их перенос в водную и воздушную среды, в организмы растений, животных и человека. С другой стороны, почва при изменении условий среды (влажности, температуры, характере растительности и др.) становится источником задержанных соединений.

Значения водородного показателя (pH) водной вытяжки определяют кислотность почвы. Почвы, отнесенные к фоновым, характеризовались в основном слабокислой реакцией среды (для верхнего горизонта $pH_{ср}$=5,6, для нижнего – 5,7), что соответствует литературным данным [18]. В семи образцах (из пятидесяти) выявлена среднекислая реакция (pH=4,5…4,9).

Почвенные пробы, отобранные на участках антропогенной нагрузки, имеют околонейтральные значения pH (для верхнего и нижнего горизонтов $pH_{ср}$=6,8). В восьми образцах (из пятидесяти трех) выявлена слабощелочная реакция (pH=7,8…8,1). Полученные данные свидетельствуют о том, что исследованные почвы по большей части в районе скважин имеют значения pH водной вытяжки выше, чем фоновые.

Содержания сульфат-ионов в почвенных пробах различаются для условно фоновых (для верхнего горизонта $C(SO_4)_{ср}$=27 мг/кг, для нижнего – 5,3 мг/кг) и подвергшихся техногенному воздействию (для верхнего горизонта $C(SO4)_{ср}$=71 мг/кг, для нижнего –

61 мг/кг). Их содержание в антропогенно-измененных почвах превышает соответствующее (по почвенному горизонту и району отбора) в фоновых пробах в 45 случаях (из 50) от 1,1 до 206 раз в верхнем горизонте (5–10 см) (рис. 3) и от 1,2 до 71 раз в нижнем (10–20 см) (рис. 4). Превышения ПДК (160 мг/кг) отмечены для одной фоновой пробы (290 мг/кг) и для шести антропогенно-измененных (168–515 мг/кг).

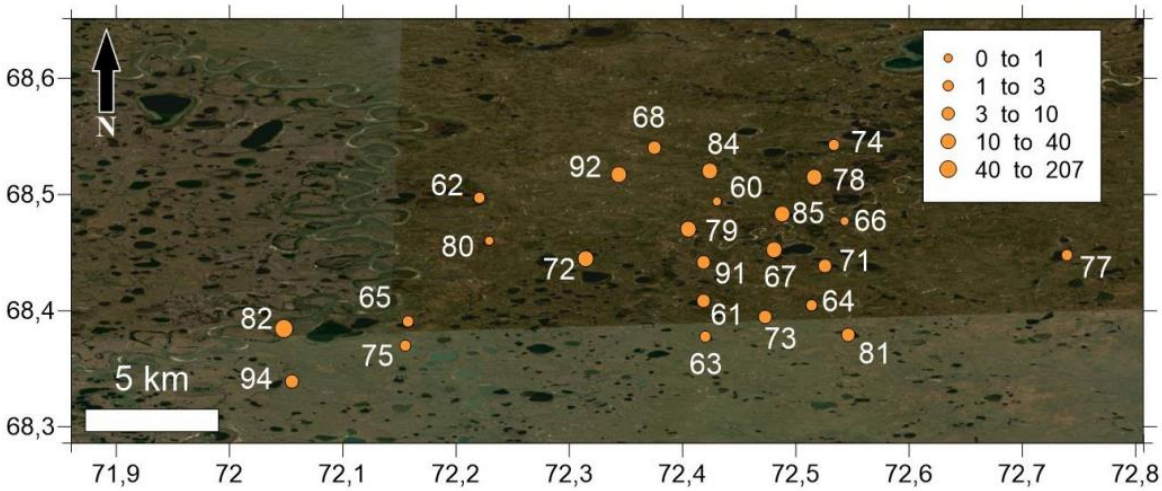



***Рис. 3.*** *Распределение относительного содержания сульфатов в верхнем почвенном горизонте. Условные обозначения: Числами обозначены номера скважин. По вертикальной и горизонтальной шкалам показаны географическая широта и долгота, соответственно. В легенде указано превышение относительно фонового значения в районе той же скважины и соответствующего почвенного горизонта*

***Fig. 3.*** *Distribution of the relative content of sulfates in the upper soil horizon. Legend: Numbers indicate well numbers. The vertical and horizontal scales show latitude and longitude, respectively. The legend indicates the excess relative to the background value in the area of the same well and the corresponding soil horizon*

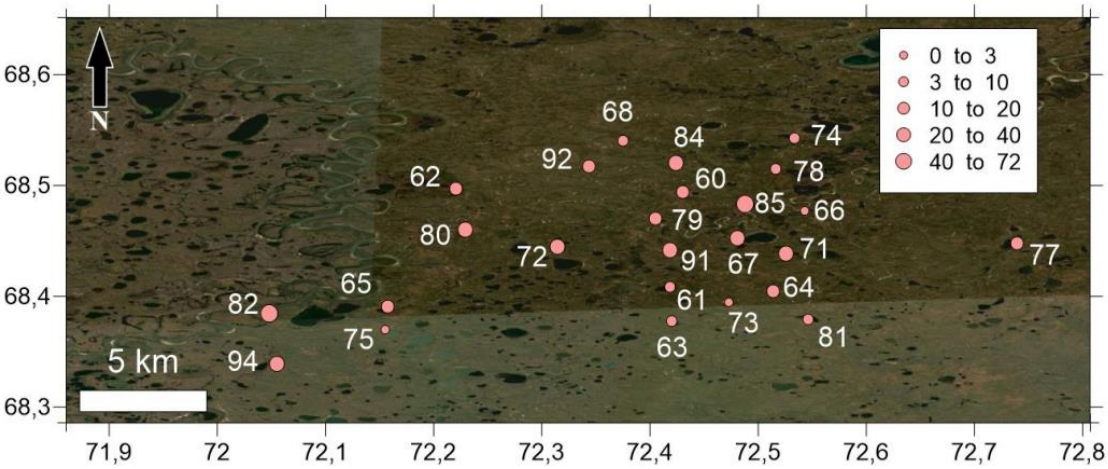



***Рис. 4.*** *Распределение относительного содержания сульфатов в нижнем почвенном горизонте. Условные обозначения: Числами обозначены номера скважин. По вертикальной и горизонтальной шкалам показаны географическая широта и долгота, соответственно. В легенде указано превышение относительно фонового значения в районе той же скважины и соответствующего почвенного горизонта*

***Fig. 4.*** *Distribution of the relative content of sulfates in the lower soil horizon. Legend: Numbers indicate well numbers. The vertical and horizontal scales show latitude and longitude, respectively. The legend indicates the excess relative to the background value in the area of the same well and the corresponding soil horizon*

Содержание хлорид-ионов как достаточно подвижных соединений невелико. Но в отличие от сульфат-ионов разница между фоновыми и антропогенно-измененными наблюдается в обратную сторону: для фоновых (для верхнего горизонта $C(Cl)_{ср}$=21 мг/кг, для нижнего – 9,4 мг/кг) и в районе бурения скважины (для обоих горизонтов $C(Cl)_{ср}$<5 мг/кг). Эта тенденция отмечена для большинства исследованных объектов (45 из 50).

Для аммония в обменной форме содержания в основном находятся ниже предела обнаружения метода (<5 мг/кг). Только результаты анализа 11 проб фоновых почв находятся выше этой границы: 5,3…20,0 мг/кг, и для трёх проб с территорий рядом со скважинами: 5–17 мг/кг. Так как разница между значениями обменного аммония с фоновых и «загрязнённых» территорий несущественна, его содержание больше определяется естественными процессами.

Содержание другой формы азота, нитрат-иона, в основном находится ниже предела обнаружения метода (<5 мг/кг). Для одной пробы фоновой почвы полученные данные находятся выше этой границы: 34 мг/кг.

Для фосфат-ионов содержания в основном находятся ниже предела обнаружения метода (<5 мг/кг). Только результаты анализа 3 проб фоновых почв находятся выше этой границы: 13, 25 и 40 мг/кг, и для одной пробы с территорий рядом со скважинами: 5 мг/кг.

### Содержание органических веществ

Исследуемый район был подвержен воздействию объектов нефтегазового комплекса, поэтому одним из важных определяемых показателей являются нефтепродукты. Нефтяное загрязнение относится к числу довольно опасных, поскольку оно существенно изменяет свойства почв. Среднее содержание нефтепродуктов в фоновых пробах исследуемых почв варьировало от <5 до 125,0 мг/кг. Среднее значение данного показателя составило 24 мг/кг для верхнего горизонта и 12 мг/кг для нижнего. Концентрация нефтепродуктов в зоне, подвергшейся техногенному воздействию, существенно выше: (для верхнего горизонта $C_{ср}$=945 мг/кг, для нижнего – 1086 мг/кг). Содержание в антропогенно-измененных почвах превышает соответствующее (по почвенному горизонту и району отбора) в фоновых пробах во всех без исключения случаях от 3,6 до 451 раз в верхнем горизонте (5–10 см) (рис. 5) и от 10 до 728 раз в нижнем (10–20 см) (рис. 6).

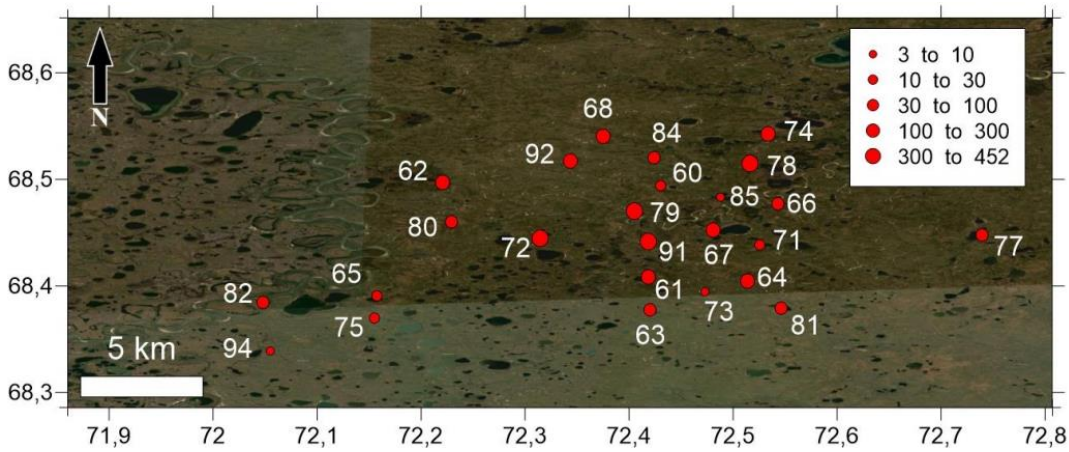



***Рис. 5.*** *Распределение относительного содержания нефтепродуктов в верхнем почвенном горизонте. Условные обозначения: Числами обозначены номера скважин. По вертикальной и горизонтальной шкалам показаны географическая широта и долгота, соответственно. В легенде указано превышение относительно фонового значения в районе той же скважины и соответствующего почвенного горизонта*

***Fig. 5.*** *Distribution of the relative content of oil products in the upper soil horizon. Legend: Numbers indicate well numbers. The vertical and horizontal scales show latitude and longitude, respectively. The legend indicates the excess relative to the background value in the area of the same well and the corresponding soil horizon*

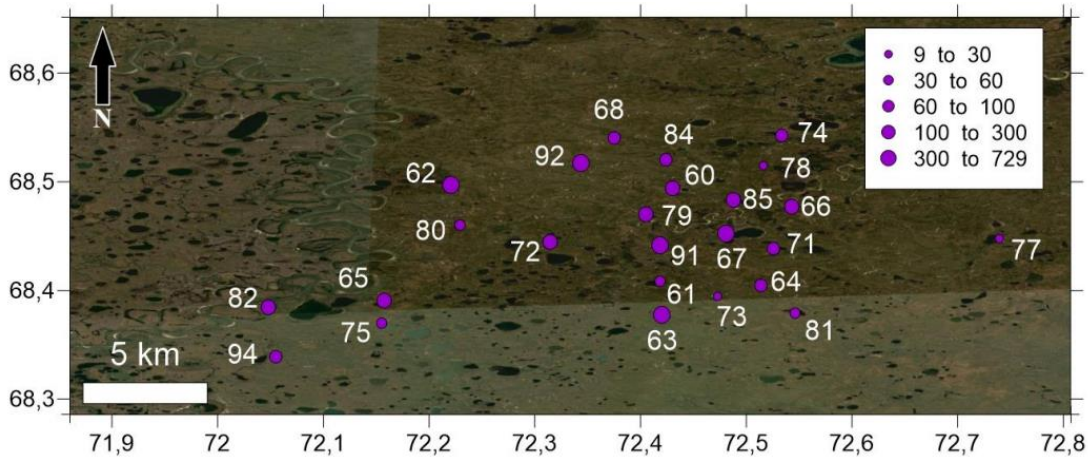



***Рис. 6.*** *Распределение относительного содержания нефтепродуктов в нижнем почвенном горизонте. Условные обозначения: Числами обозначены номера скважин. По вертикальной и горизонтальной шкалам показаны географическая широта и долгота, соответственно. В легенде указано превышение относительно фонового значения в районе той же скважины и соответствующего почвенного горизонта*

***Fig. 6.*** *Distribution of the relative content of oil products in the lower soil horizon. Legend: Numbers indicate well numbers. The vertical and horizontal scales show latitude and longitude, respectively. The legend indicates the excess relative to the background value in the area of the same well and the corresponding soil horizon*

Фенолы в почве могут быть как естественного происхождения в качестве продуктов жизнедеятельности растений, животных и микроорганизмов, так и попавшие антропогенным путем. В данном случае при анализе данных установлено, что содержание в антропогенно-измененных почвах превышает соответствующее (по почвенному горизонту и району отбора) в фоновых пробах в 23 (из 25) случаях от 1,1 до 52 раз в верхнем горизонте (5–10 см) и в 20 (из 25) от 1,1 до 56 раз в нижнем (10–20 см). Такие устойчивые закономерности свидетельствуют о том, что присутствие части фенолов вызвано прошедшим техногенным воздействием.

К группе АПАВ относятся соединения, которые, растворяясь в воде, образуют адсорбционно активные анионы и адсорбционно неактивные катионы. Содержания АПАВ в почвенных пробах примерно одинаковы для условно фоновых (для верхнего горизонта $C(АПАВ)_{ср}$=1,3 мг/кг, для нижнего – 1,4 мг/кг) и подвергшихся техногенному воздействию (для верхнего горизонта $C(АПАВ)_{ср}$=1,5 мг/кг, для нижнего – 1,2 мг/кг). И эти величины существенно меньше литературных данных ($C(АПАВ)_{ср}$=30 мг/кг) по исследованию почв в районе площадок бурения [19].

### Микроэлементный состав почвенных проб

Концентрации тяжелых металлов (кадмий, марганец, медь, никель, ртуть, хром) во всех исследованных пробах находятся ниже ПДК (или ОДК). Для кадмия и ртути содержания на антропогенно-измененной и на фоновой территориях практически не отличаются. Но тем не менее наибольшие содержания ртути относятся к антропогенно- измененным пробам (67/1 и 68/2).

Для остальных элементов наблюдаются достоверные превышения концентраций с зоны, подвергшейся техногенному воздействию, над фоновой, что говорит об их техногенном источнике.

При анализе данных установлено, что содержание меди в антропогенно-измененных почвах превышает соответствующее (по почвенному горизонту и району отбора) в фоновых пробах в 21 (из 25) случае от 1,2 до 16,8 раз в верхнем горизонте (5–10 см) и в 21 (из 25) от 1,7 до 12 раз в нижнем (10–20 см). Это свидетельствуют о том, что повышенное содержание меди вызвано прошедшим техногенным воздействием.

Высокое содержание бария в пробах антропогенно-измененных почв вместе с уже рассмотренным повышенным содержанием сульфатов указывает на загрязнение сульфатом бария, используемым в качестве компонента в буровых растворах. Также это подтверждается совпадением распределений относительного превышения содержания бария в верхнем (рис. 7) и нижнем (рис. 8) почвенных горизонтах и соответствующих распределений сульфат-ионов (рис. 3, 4).

При анализе данных установлено, что содержание никеля в антропогенно-измененных почвах превышает соответствующее (по почвенному горизонту и району отбора) в фоновых пробах в 17 (из 25) случаях от 1,5 до 23,2 раз в верхнем горизонте (5–10 см) и в 21 (из 25) от 1,4 до 27,6 раз в нижнем (10–20 см). Это свидетельствуют о том, что повышенное содержание никеля вызвано прошедшим техногенным воздействием.

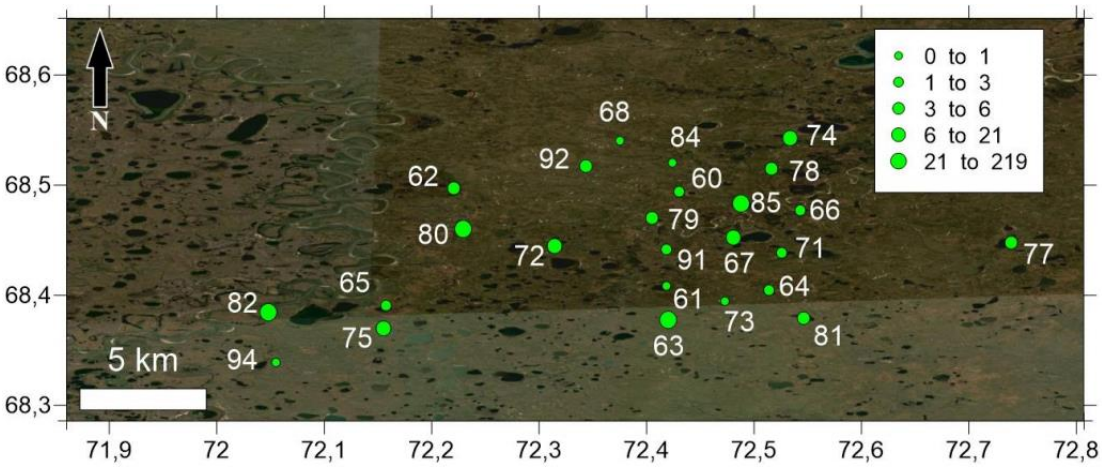



***Рис. 7.*** *Распределение относительного содержания бария в верхнем почвенном горизонте. Условные обозначения: Числами обозначены номера скважин. По вертикальной и горизонтальной шкалам показаны географическая широта и долгота, соответственно. В легенде указано превышение относительно фонового значения в районе той же скважины и соответствующего почвенного горизонта*

***Fig. 7.*** *Distribution of the relative content of barium in the upper soil horizon. Legend: Numbers indicate well numbers. The vertical and horizontal scales show latitude and longitude, respectively. The legend indicates the excess relative to the background value in the area of the same well and the corresponding soil horizon*

Для сорока проб (из 103) установлены превышения содержания мышьяка над его ПДК, но при этом средние концентрации мышьяка в почвенных пробах примерно одинаковы для условно фоновых (для верхнего горизонта $C(As)_{ср}$=2,1 мг/кг, для нижнего – 1,6 мг/кг) и подвергшихся техногенному воздействию (для верхнего горизонта $C(As)_{ср}$=2,2 мг/кг, для нижнего – 2,0 мг/кг). Повышенный общий фон мышьяка в регионе подтверждается и ранее проведенными исследованиями [20].

Выявлено, что содержание марганца в антропогенно-измененных почвах превышает соответствующее (по почвенному горизонту и району отбора) в фоновых пробах в 15 (из 25) случаях от 1,2 до 28,3 раз в верхнем горизонте (5–10 см) и в 18 (из 25) от 1,1 до 32,9 раз в нижнем (10–20 см). Возможно, это вызвано прошедшим техногенным воздействием при общем высоком уровне содержания марганца в почвах в регионе.

Локальные превышения (2 из 103) содержаний свинца над ПДК при общем невысоком фоне могут указывать на присутствие остатков свинцовосодержащих устройств.

При анализе данных установлено, что содержание цинка в антропогенно-измененных почвах превышает соответствующее (по почвенному горизонту и району отбора) в фоновых пробах в 19 (из 25) случаях от 1,1 до 70 раз в верхнем горизонте (5–10 см) и в 22 (из 25) от 1,1 до 14 раз в нижнем (10–20 см). Такие устойчивые закономерности свидетельствуют о том, что повышенное содержание цинка вызвано прошедшим техногенным воздействием. И в 37 пробах (из 53) с территории, подвергшейся антропогенному воздействию, и для 11 фоновых проб содержание цинка превышает ПДК.

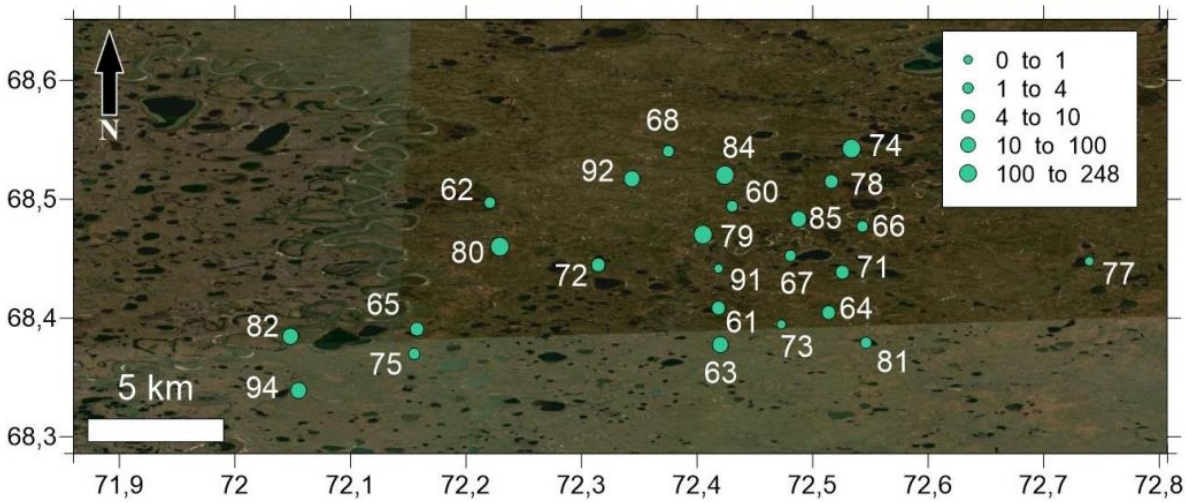



***Рис. 8.*** *Распределение относительного содержания бария в нижнем почвенном горизонте. Условные обозначения: Числами обозначены номера скважин. По вертикальной и горизонтальной шкалам показаны географическая широта и долгота, соответственно. В легенде указано превышение относительно фонового значения в районе той же скважины и соответствующего почвенного горизонта*

***Fig. 8.*** *Distribution of the relative content of barium in the lower soil horizon. Legend: Numbers indicate well numbers. The vertical and horizontal scales show latitude and longitude, respectively. The legend indicates the excess relative to the background value in the area of the same well and the corresponding soil horizon*

### Химическое загрязнение почв на исследованном участке

Рассчитанные величины Zc позволили оценить категории загрязнения почв по справочной шкале (табл. 1).

Во всех образцах почв концентрации нефтепродуктов (НП) существенно превышают фоновые (только в 3 пробах – коэффициенты концентрации (Кс) для НП равны 4–8), в остальных образцах Кс=10–728. Высоки Кс по фенолам (Кс=2–56), АПАВ (Кс=2–21), сульфат-ионам (Кс=2–206). Среди металлов наиболее высоки Кс по барию, никелю, свинцу и хрому.

По суммарному показателю Zc четырнадцать образцов можно отнести к категории опасных (в районе скважин 60, 61, 65, 66, 68, 73, 75, 77, 78, 80, 81, 85, преимущественно в верхнем горизонте 5–10 см), один образец (94/1_ps) – к умеренно опасным, остальные 35 проб можно назвать по вышеуказанной градации «чрезвычайно опасными». При этом основной вклад в суммарный Zc, рассчитанный по всем показателям, вносят нефтепродукты.

Дополнительно были рассчитаны коэффициенты концентрации и суммарные показатели загрязнения только по металлам. Суммарный показатель загрязнения в опасных, умеренно опасных и чрезвычайно опасных пробах складывается из коэффициентов концентрирования по 6–9 показателям, то есть почти по всем установленным металлам и мышьяку. Зачастую около одной и той же скважины пробы из верхнего и нижнего почвенных горизонтов относятся к разным категориям. В итоге к категории «допустимых» относятся уровни загрязнения в 11 почвенных образцах (8 скважин), умеренно опасных – в 11 пробах (9 скважин), опасных – 20 (17 скважин), чрезвычайно опасных – в 8 пробах (8 скважин). Самые высокие коэффициенты концентрации, которые определили «чрезвычайно опасную» категорию почв, характерны для бария (Кс до 248), свинца (Кс до 75) и хрома (Кс до 44).

### Закономерность распределения геохимических показателей в почве и характер влияния на них антропогенного загрязнения

В рамках данной работы изучался характер распределения геохимических показателей в пробах почв верхнего (глубина 0–10 см) и нижнего (глубина 10–20 см) горизонтов. Рассчитывалось среднее содержание в верх-

нем ($C_{сред}^{ВГ}$) и нижнем ($C_{сред}^{НГ}$) слоях. Разброс значений оценивался по среднеквадратичному отклонению (СКО). Взаимосвязь геохимических распределений на разных уровнях в фоновых и загрязненных пробах оценивалась на основе коэффициентов парной корреляции по каждому показателю. При расчете коэффициентов корреляции по некоторым показателям исключались экстремально высокие (ураганные) значения в отдельных точках. Сопоставление статистических показателей позволило выявить влияние антропогенного загрязнения на закономерности геохимических распределений. Из рассмотрения были исключены распределения массовой доли фосфатов, нитратов, ртути и кадмия, т. к. их значения в основном ниже предела обнаружения методик измерения.

### Распределение геохимических показателей в фоновых пробах

По ряду показателей наблюдается заметная корреляционная зависимость (коэффициенты корреляции 0,2…0,3) значений в нижнем и верхнем горизонте (табл. 2). Это аммоний, сульфаты, хлориды, некоторые металлы (полуметаллы), нефтепродукты, АПАВ и pH.

Указанные показатели, за исключением pH, характеризуются большим разбросом значений и высоким уровнем среднего содержания в верхнем горизонте за счет наличия в отдельных точках ураганных величин массовой доли. Наиболее сильно это проявляется в распределениях аммония, сульфатов, хлоридов и нефтепродуктов. Вошедшие в эту группу показателей металлы – барий, марганец и мышьяк – характеризуются относительно стабильным распределением.

В целом можно отметить, что заметной корреляционной связью характеризуются показатели с высоким содержанием в почве, уверенно фиксируемые при измерениях. При этом разброс значений массовой доли в верхнем горизонте значительно выше, чем в нижнем.

Показатели с низким содержанием в почве (медь, никель, свинец, хром VI, цинк и фенолы) отличаются хаотичными, случайными распределениями и, как следствие, отсутствием корреляции между значениями в верхнем и нижнем горизонтах (значения $K_{корр}$). Средние содержания ($C_{сред}^{ВГ}$, $C_{сред}^{НГ}$) и СКО $СКО^{ВГ}$ $СКО^{НГ}$ в верхнем и нижнем горизонте практически на одном уровне.

Резюмируя, можно отметить довольно существенные различия между значениями геохимических показателей разных горизонтов в фоновых точках отбора. Заметная корреляция наблюдается по показателям с относительно высоким содержанием в почве. Характер их распределения таков, что в верхнем горизонте в отдельных точках отмечаются ураганные значения концентраций. Если исключить их из рассмотрения, то по гистограммам (рис. 9) можно увидеть, что уровень значений всех показателей в обоих горизонтах примерно одинаков.

***Таблица 2.*** *Статистические показатели по загрязненным и фоновым пробам*
***Table 2.*** *Statistical indicators for contaminated and background samples*

| Показатель<br>Mark | Фоновые пробы<br>Background samples | | | | | Загрязненные пробы<br>Contaminated samples | | | | |
|---|---|---|---|---|---|---|---|---|---|---|
| | $K_{корр}$<br>$K_{corr}$ | $C_{сред}^{ВГ}$<br>$C_{aver}^{UL}$ | $C_{сред}^{НГ}$<br>$C_{aver}^{LL}$ | $СКО^{ВГ}$<br>$STD^{UL}$ | $СКО^{НГ}$<br>$STD^{LL}$ | $K_{корр}$<br>$K_{corr}$ | $C_{сред}^{ВГ}$<br>$C_{aver}^{UL}$ | $C_{сред}^{НГ}$<br>$C_{aver}^{LL}$ | $СКО^{ВГ}$<br>$STD^{UL}$ | $СКО^{НГ}$<br>$STD^{LL}$ |
| pH | 0,26 | 5,6 | 5,8 | 0,6 | 0,5 | 0,23 | 6,8 | 6,8 | 0,8 | 0,9 |
| АПАВ<br>Anionic surfactants | 0,26 | 1,3 | 1,3 | 1,7 | 2,5 | 0,52 | 1,1 | 1,1 | 0,8 | 1,2 |
| Нефтепродукты<br>Oil products | 0,19 | 25 | 11,6 | 33 | 10 | 0,03 | 950 | 1090 | 580 | 670 |
| Аммоний/Ammonium | 0,23 | 5,9 | 3,4 | 5,2 | 2,8 | 0,68 | 0,4 | 0,8 | 1,5 | 3,4 |
| Сульфат-ион<br>Sulfate ion | 0,23 | 28 | 6 | 61 | 5 | 0,64 | 67 | 61 | 104 | 59 |
| Хлорид-ион<br>Chloride ion | 0,19 | 21 | 9,6 | 28 | 6,7 | 0,55 | 4,9 | 4 | 4,2 | 1,8 |
| Барий/Barium | 0,2 | 43 | 39 | 34 | 29 | 0,24 | 200 | 740 | 240 | 1390 |
| Марганец/Manganese | 0,3 | 110 | 86 | 108 | 77 | 0,29 | 130 | 130 | 87 | 89 |
| Мышьяк/Arsenic | 0,36 | 2,1 | 1,7 | 3,1 | 0,9 | 0,53 | 2,3 | 1,9 | 2,2 | 1,6 |
| Медь/Copper | 0,04 | 0,7 | 0,8 | 0,5 | 0,6 | 0,34 | 2,6 | 2 | 2,3 | 1,4 |
| Никель/Nickel | –0,18 | 0,4 | 0,7 | 0,8 | 1,2 | 0,33 | 2,4 | 2,9 | 2 | 1,8 |
| Свинец/Lead | 0,07 | 0,5 | 0,6 | 0,5 | 0,4 | 0,02 | 6,9 | 2,5 | 18 | 3,8 |
| Хром/Chromium | 0,1 | 2,6 | 2,7 | 3,2 | 3 | 0,78 | 6,7 | 6,9 | 4,2 | 3,8 |
| Цинк/Zinc | 0,14 | 15,1 | 16,2 | 11,5 | 10,8 | 0,47 | 43 | 32 | 43 | 15 |
| Фенолы/Phenols | –0,06 | 0,3 | 0,4 | 0,4 | 0,4 | –0,01 | 0,9 | 0,9 | 0,4 | 0,4 |

### Распределение геохимических показателей в загрязненных пробах

В первую очередь следует отметить сходимость между распределениями значений отдельных показателей в верхнем и нижнем горизонтах, что наглядно демонстрируется на графиках (рис. 10) и в значениях коэффициентов корреляции (табл. 2). Это справедливо как для тех веществ, содержания которых выросли многократно (например, металлы в 2–10 раз, сульфат-ион), так и для тех, среднее содержание которых не изменилось (АПАВ и мышьяк) либо значительно снизилось (аммоний-ион, хлориды). Практически не изменились содержание марганца и уровень pH, а также их корреляции между распределениями в верхнем и нижнем горизонтах.

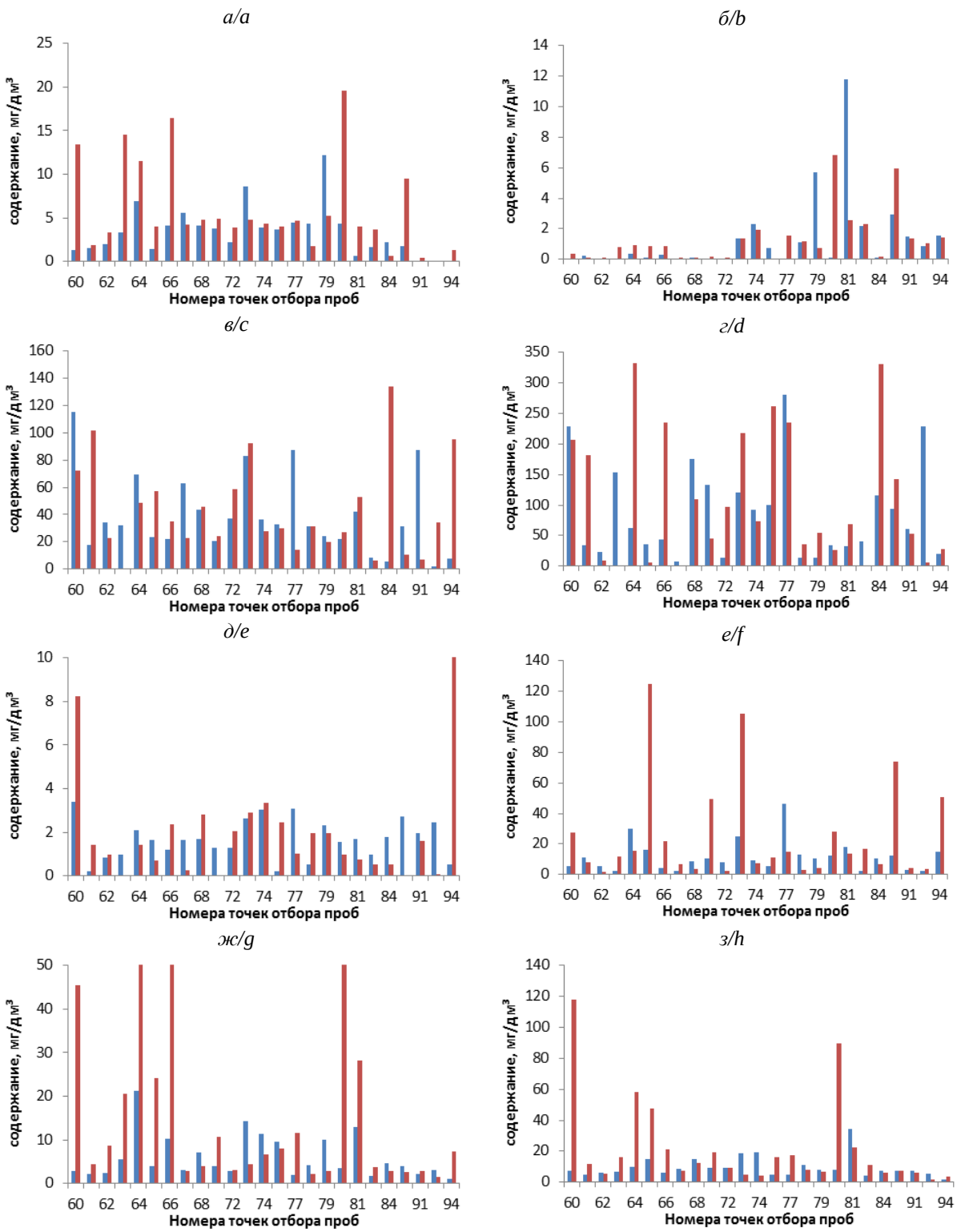



***Рис. 9.*** *Распределение геохимических показателей в фоновых пробах верхнего (красный цвет) и нижнего (синий цвет) горизонтов: а) аммоний, б) АПАВ, в) барий, г) марганец, д) мышьяк, е) нефтепродукты, ж) сульфат-ион, з) хлорид-ион*

***Fig. 9.*** *Distribution of geochemical indicators in the background samples of the upper (red) and lower (blue) horizons: a) ammonium, b) anionic surfactant, c) barium, d) manganese, e) arsenic, f) oil products, g) sulfate ion, h ) chloride ion*

В загрязненных пробах в 100 раз увеличилось содержание нефтепродуктов. Содержание в верхнем и нижнем горизонте примерно одинаково, но распределения не коррелируют между собой. Нефтепродукты являются основным фактором загрязнения, что отражается в многократном росте среднего уровня их концентраций. Колебания содержания нефтепродуктов относительно этого уровня в зависимости от локальных условий их ассимиляции могут носить случайный характер, что отражается в отсутствии корреляции.

В 5 раз увеличивается среднее содержание бария, а в четырех пробах нижнего горизонта фиксируется увеличение в 90 раз, что, как уже упоминалось выше, связывается с загрязнением сульфатом бария. Растворимость сульфата бария крайне невелика, около 2 мг/дм$^3$, однако при длительном нахождении в водной или водонасыщенной среде он будет являться источником водорастворенных сульфатов пролонгированного действия, что приводит к увеличению их содержания в водных вытяжках. Относительно тяжелые ионы бария могут постепенно удаляться из приповерхностных отложений, замещаясь в растворе более легкими ионами других металлов (марганца, меди, никеля, хрома и цинка). В пробах нижнего горизонта среднее содержание бария существенно выше, чем в верхнем горизонте, тогда как для других металлов такой тенденции не выявлено.

Коэффициент корреляции между распределениями валового содержания бария и концентрацией сульфат-ионов в водной вытяжке почв верхнего горизонта составляет 0,62, в нижнем горизонте аналогичный коэффициент корреляции уже составляет 0,16. Примечательно также, что отмечается заметная корреляционная связь между валовым содержанием бария в верхнем горизонте и концентрацией сульфатов в нижнем (коэффициент корреляции 0,26), тогда как обратной связи не наблюдается (коэффициент корреляции между содержанием бария в нижнем горизонте и концентрацией сульфат-ионов в верхнем составляет 0,05). В фоновых пробах заметных корреляционных связей между содержаниями бария и сульфат-ионов не наблюдается (коэффициенты корреляции между распределениями в разных горизонтах составляют – 0,07; 0,03; 0,07; 0,2).

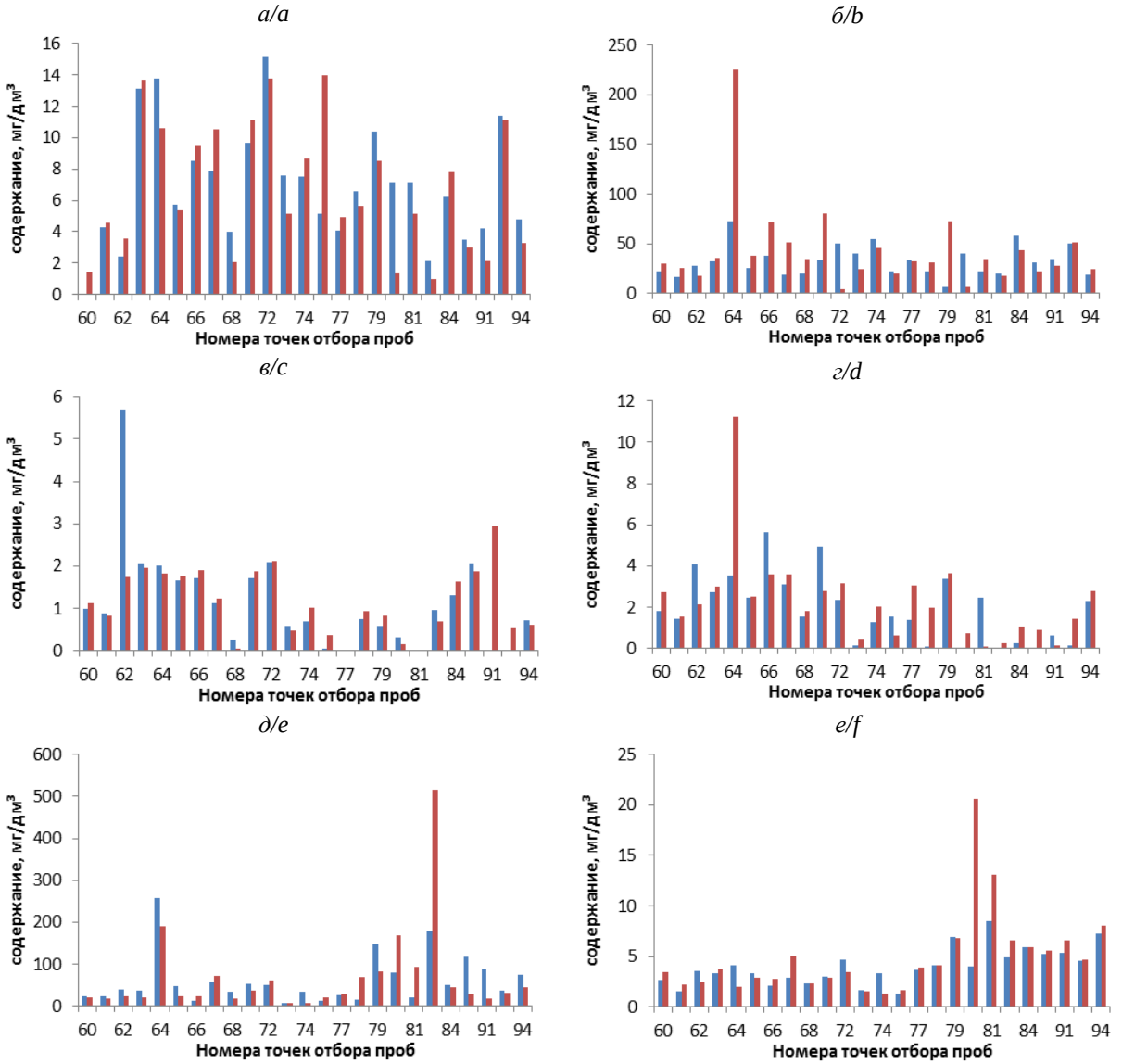



***Рис. 10.*** *Распределение геохимических показателей в загрязненных пробах верхнего (красный цвет) и нижнего (синий цвет) горизонтов: а) хром, б) цинк, в) АПАВ, г) мышьяк, д) сульфат-ион, е) хлорид-ион*

***Fig. 10.*** *Distribution of geochemical indicators in contaminated samples of the upper (red) and lower (blue) horizons: a) chromium, b) zinc, c) anionic surfactants, d) arsenic, e) sulfate ion, f) chloride ion*

Все вышеперечисленное говорит о поверхностном источнике как бария, так и большей части сульфатов водной вытяжки.

Поступление ионов металлов за счет коррозии металлических конструкций приводит к восстановлению ионов водорода и, как следствие, увеличению pH. Это в свою очередь способствует образованию слаборастворимых солей, например, хлоридов и сульфатов свинца и хрома. Если основным источником сульфатов является антропогенное загрязнение, то хлориды не успевают восполняться естественным образом и их содержание падает.

Снижение содержания обменного аммония в загрязненных пробах может быть связано с замещением атомов водорода на органические радикалы и образованием соединений одно-, двух- (и т. д.) замещённого аммония.

### Заключение

Почвенные пробы, отобранные с территории, ранее подвергшейся техногенному воздействию, содержат ряд последствий этого воздействия, что отражается при их сравнении с составом соответствующих почвенных проб, выбранных в качестве фона. Исходя из полученных данных, можно отметить, что почвы загрязнены нефтепродуктами, сульфатами, барием, цинком и фенолами. Но при этом многочисленные превышения ПДК (при наличии соответствующего параметра в нормативных документах) установлены только для цинка и мышьяка, причем для обоих элементов высокие концентрации отмечены и в фоновых пробах, что можно считать особенностью региона.

Важно отметить, что с момента проведения бурения и до момента проведения экологической съемки прошло в среднем около 30 (тридцати!) лет. Даже за такой долгий период природа не успела восстановиться на относительно небольших по площади точечных загрязнениях. Это отличительная особенность именно северных территорий, где загрязнение большую часть времени законсервировано низкими температурами.

По суммарному показателю загрязнения четырнадцать почвенных образцов относятся к категории опасных (в районе скважин 60, 61, 65, 66, 68, 73, 75, 77, 78, 80, 81, 85, преимущественно в верхнем горизонте 5–10 см), один образец (верхний горизонт в районе скв. 94) – к умеренно опасным, остальные 35 проб (в районе всех исследованных скважин кроме 75 и 77) можно назвать по вышеуказанной градации «чрезвычайно опасными». Основной вклад в суммарный показатель загрязнения вносят нефтепродукты.

По суммарному показателю загрязнения, рассчитанному только по коэффициентам концентрации металлов, выявлено многокомпонентное загрязнение почвенного покрова (преимущественно соединениями бария, свинца и хрома). Умеренно опасными считаются 11 проб (скважины №№ 78 и 81, верхние горизонты у скв. 62, 66, 75, 79, нижний горизонт возле скв. 61, 65, 85), опасными – 20 проб (скважины №№ 64, 71, 72, верхние горизонты у скв. 65, 77, 80, 84, 85, нижний горизонт возле скв. 62, 63, 66, 67, 73, 75, 82, 92, 94) и чрезвычайно опасными – 8 проб (верхние горизонты у скв. 63, 67, 82, 92, нижний горизонт возле скв. 74, 79, 80, 84).

При сопоставлении значений показателей в верхнем и нижнем горизонтах фоновых проб отмечается довольно сильные различия, видимо, в силу естественных процессов аккумуляции под действием геохимических барьеров. Однако **при антропогенном загрязнении территории** действие этих процессов нивелируется и между распределениями в верхнем и нижнем горизонтах **устанавливается сильная корреляционная связь** практически для всех показателей. Это справедливо как для показателей, показавших многократное увеличение (прямое загрязнение, распространившееся на определенную глубину), так и для показателей, значения которых почти не изменились либо сильно снизились (косвенное влияние, обусловленное антропогенными факторами, отвечающими за перераспределение химических элементов и их соединений по глубине). Следовательно, антропогенное загрязнение приводит к длительному по времени устранению неоднородностей естественного геохимического поля по глубине за счет:

1) прямого увеличения содержания того или иного загрязнителя и как следствие относительного снижения естественных неоднородностей этого вещества;
2) формирования определенной физико-химической обстановки, однородной в пределах некоторой глубины, в которой происходит вторичное перераспределение показателей, не являющихся загрязнителями.

*Исследование выполнено по программе ФНИ (проект № 0266-2019-0008).*

### СПИСОК ЛИТЕРАТУРЫ

1. Emmerson C., Lahn G. Arctic opening: opportunity and risk in the high north. – London: Lloyd's, 2012. – 60 p.
2. Lindholt L. Arctic natural resources in a global perspective // The economy of the North. – Oslo: Statistics Norway, 2006. – P. 27–28.
3. Sherlock R.L., Scott D.J., MacKay G. Bringing sustainability to the people of Nunavut // Geotimes. – 2003. – V. 48. – № 12. – P. 18–21.
4. Mining in the Arctic environment – a review from ecological, socioeconomic and legal perspectives / A. Tolvanen, P. Eilu, A. Juutinen, K. Kangas, M. Kivinen, M. Markovaara-Koivisto, A. Naskalie, V. Salokannelf, S. Tuulentiee, J. Simila // Journal of environmental management. – 2019. – V. 233. – P. 832–844.
5. Брехунцов А.М., Петров Ю.В., Прыкова О.А. Экологические аспекты освоения природно-ресурсного потенциала российской Арктики // Арктика: экология и экономика. – 2020. – № 3. – С. 34–47.
6. Facies analysis of yedoma thermokarst lakes on the northern Seward Peninsula, Alaska / L. Farquharson, K.W. Anthony, N. Bigelow, M. Edwards, G. Grosse // Sedimentary Geology. – 2016. – V. 340. – P. 25–37.
7. Evidence of the impacts of metal mining and the effectiveness of mining mitigation measures on social-ecological systems in Arctic and boreal regions: a systematic map protocol / N.R. Haddaway, S.J. Cooke, P. Lesser, B. Macura, A.E. Nilsson, J.J. Taylor, K. Raito // Environmental Evidence. – 2019. – V. 8. – № 1. – P. 1–11.
8. Алекин О.А. Основы гидрохимии. – Л.: Гидрометеоиздат, 1970. – 444 с.
9. Kirby C.S., Cravotta III C.A. Net alkalinity and net acidity 1: theoretical considerations // Applied Geochemistry. – 2005. – V. 20. – № 10. – P. 1920–1940.

10. Южанина А.А., Кремлева Т.А. Влияние генезиса малых рек Надымского района на химический состав вод и экологическое состояние // Биогеохимия химических элементов и соединений в природных средах: материалы III Международной школы-семинара молодых исследователей. – Тюмень, 23–28 апреля 2018. – С. 206–212.
11. Геохимические закономерности распространения элементов в водах озер арктических регионов / Т.И. Моисеенко, М.И. Дину, Н.А. Гашкина, Т.А. Кремлева, В.Ю. Хорошавин // Геохимия. – 2020. – Т. 65. – № 6. – С. 521–532.
12. Neutral mine drainage / C.M. Pettit, J.M. Scharer, D.B. Chambers, B.E. Halbert, J.L. Kirkaldy, L. Bolduc // Proc.s of Mining and the Environment. – Sudbury, Canada, 1999. – P. 829–838.
13. ПНД Ф 16.1.8-98. Количественный химический анализ почв. Методика выполнения измерений массовой концентрации ионов нитрита, нитрата, хлорида, фторида, сульфата и фосфата в пробах почв (водорастворимая форма) методом ионной хроматографии. – М.: Изд-во «АналитИнвест», 1998. – 25 с.
14. ПНД Ф 16.1:2.21-98. Количественный химический анализ почв. Методика выполнения измерений массовой доли нефтепродуктов в пробах почв и грунтов флуориметрическим методом с использованием анализатора жидкости «Флюорат-02». – М.: Изд-во «Люмекс», 1998. – 22 с.
15. ПНД Ф 16.1.2.3:3.44-05. Методика выполнения измерений массовой доли летучих фенолов в пробах почв, осадках сточных вод и отходов фотометрическим методом после отгонки с водяным паром. – М.: Федеральная служба по экологическому, технологическому и атомному надзору, 2005. – 17 с.
16. ПНД Ф 16.1:2:2.2:3.66-10. Количественный химический анализ почв. Методика измерений массовой доли анионных поверхностно-активных веществ в пробах почв, грунтов, донных отложений, илов, отходов производства и потребления экстракционно-фотометрическим методом. – М.: Федеральная служба по экологическому, технологическому и атомному надзору, 2010. – 20 с.
17. МУ 2.1.7.730-99. Методические указания. 2.1.7. Почва, очистка населенных мест, бытовые и промышленные отходы, санитарная охрана почвы. Гигиеническая оценка качества почвы населенных мест. – М.: Радон, 1999. – 20 с.
18. Экологическая оценка состояния почвенного покрова оленьих пастбищ полуострова Ямал / Л.Н. Скипин, А.А. Галямов, Е.В. Гаевая, Е.В. Захарова // Вестник Красноярского государственного аграрного университета. – 2016. – № 12. – С. 194–202.
19. Кукушкин С.Ю., Опекунова М.Г., Опекунов А.Ю. Оценка загрязнения тундровых почв на участках поисково-оценочного бурения (Ямало-Ненецкий автономный округ) // Отходы, причины их образования и перспективы использования: сб. науч. тр. по материалам Междунар. науч. экол. конф. / сост. Л.С. Новопольцева; под ред. И.С. Белюченко. – Краснодар: КубГАУ, 2019 – С. 325–328.
20. Оценка экотоксилогического состояния почв Полярного Урала и Южного Ямала / И.И. Алексеев, Н.В. Динкелакер, А.А. Орипова, Г.А. Семьина, А.А. Морозов, Е.В. Абакумов // Гигиена и санитария. – 2017. – Т. 96. – № 10. – С. 941–945.

*Поступила 01.12.2021 г.*

**Информация об авторах**

***Тимшанов Р.И.***, кандидат геолого-минералогических наук, заведующий лабораторией физико-химических методов исследований Западно-Сибирского филиала Института нефтегазовой геологии и геофизики им. А.А. Трофимука СО РАН.

***Колесников Р.А.***, кандидат географических наук, заведующий научно-исследовательским сектором охраны окружающей среды ГКУ ЯНАО «Научный центр изучения Арктики».

***Моргун Е.Н.***, кандидат биологических наук, ведущий научный сотрудник, научно-исследовательский сектор охраны окружающей среды ГКУ ЯНАО «Научный центр изучения Арктики».

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

***Юркевич Н.В.***, кандидат геолого-минералогических наук, заведующая лабораторией эколого-экономического моделирования техногенных систем Института нефтегазовой геологии и геофизики им. А.А. Трофимука СО РАН.

***Кулешова Т.А.***, младший научный сотрудник, Институт нефтегазовой геологии и геофизики им. А.А. Трофимука СО РАН.

UDC 504.062.4:332.142.6: 631.42

# ASSESSMENT OF THE RESIDUAL CONTAMINATION AT THE DRILLING SITES OF THE ROSTOVTSEVSKOE FIELD

**Rustam I. Timshanov[1],**
TimshanovRI@ipgg.sbras.ru

**Roman A. Kolesnikov[2],**
roman387@mail.ru

**Evgeniya N. Morgun[2],**
morgun148@gmail.com

**Aleksey V. Edelev[1],**
EdelevAV@ipgg.sbras.ru

**Nataliya V. Yurkevich[1],**
YurkevichNV@ipgg.sbras.ru

**Tatyana A. Kuleshova[1],**
KuleshovaTA@ipgg.sbras.ru

[1] Trofimuk Institute of Petroleum Geology and Geophysics SB RAS, West Siberian Branch,
3, Ac. Koptyug avenue, Novosibirsk, 630090, Russia.

[2] Governmental State Institution of the Yamal-Nenets Autonomous District «Scientific Center for Arctic Studies»,
20, Respubliki street, Salekhard, 629008, Russia.

***The relevance*** *of the research is caused by the long-term impact on environmental objects (in particular, soil) of exploration well sites drilled in the 80–90s of the 20th century on the territory of the continental part of the Russian Arctic. The persistence of pollution is primarily due to the low self-purification capacity of northern ecosystems. Assessment of the environmental hazard of contaminated soils and industrial and economic waste using the example of the Rostovtsevskoe field will allow considering the possibility of implementing measures to restore ecosystem components.*
***The aim*** *of the work is to assess the current state of the soil cover at the Rostovtsevskoe hydrocarbon field.*
***Object*** *of the research is the territory in the area of 25 wells of the Rostovtsevskoe hydrocarbon field (Yamal Peninsula, the Yamal-Nenets Autonomous District) drilled in the period from 1986 to 1989.*
***Methods.*** *The set of studies included the sampling and laboratory analysis of 103 samples of background and contaminated soils from the upper (0–10 cm) and lower (10–20 cm) horizons. Particular attention was paid to the study of the anionic-cationic composition, the content of metals, oil products, phenols, anionic surfactants.*
***Results.*** *The fact of direct soil contamination with oil products, barium sulfate, zinc, lead and other metals has been established. In addition, anthropogenic impact led to the suppression of natural inhomogeneities of the geochemical field and the formation of a homogeneous near-surface physicochemical environment. Within the soil layer, a redistribution of compounds and elements is noted, the content of which either did not change (anionic surfactants, arsenic), or significantly decreased (chloride ion, ammonium). According to the total pollution index the content of harmful substances near the 23 out of 25 researched drilling sites is characterized as extremely dangerous. The main contribution to the total pollution index is made by oil products.*

***Key words:***
*Residual hydrocarbon pollution, ecology, anthropogenic impact, natural geochemical field, drilling sites, oil products in the soil, restoration of arctic ecosystems.*

*The study was carried out under the Federal Scientific Research program (project No. 0266-2019-0008).*

## REFERENCES

1. Emmerson C., Lahn G. *Arctic opening: opportunity and risk in the high north*. London, Lloyd's, 2012. 60 p.
2. Lindholt L. Arctic natural resources in a global perspective. *The economy of the North*. Oslo, Statistics Norway, 2006. pp. 27–28.
3. Sherlock R.L., Scott D.J., MacKay G. Bringing sustainability to the people of Nunavut. *Geotimes*, 2003, vol. 48, no. 12, pp. 18–21.
4. Tolvanen A., Eilu P., Juutinen A., Kangas K., Kivinen M., Markovaara-Koivisto M., Naskalie A., Salokannelf V., Tuulentiee S., Simila J. Mining in the Arctic environment – a review from ecological, socioeconomic and legal perspectives. *Journal of environmental management*, 2019, vol. 233, pp. 832–844.
5. Brekhuntsov A.M., Petrov Y.V., Prykova O.A. Environmental aspects of the development of the natural resource potential of the Russian Arctic. *Arctic: ecology and economics*, 2020, no. 3, pp. 34–47. In Rus.
6. Farquharson L., Anthony K.W., Bigelow N., Edwards M., Grosse G. Facies analysis of yedoma thermokarst lakes on the northern Seward Peninsula, Alaska. *Sedimentary Geology*, 2016, vol. 340, pp. 25–37.
7. Haddaway N.R., Cooke S.J., Lesser P., Macura B., Nilsson A.E., Taylor J.J., Raito K. Evidence of the impacts of metal mining and the effectiveness of mining mitigation measures on social-ecological systems in Arctic and boreal regions: a systematic map protocol. *Environmental Evidence*, 2019, vol. 8, no. 1, pp. 1–11.
8. Alekin O.A. *Osnovy gidrokhimii* [Fundamentals of hydrochemistry]. Leningrad, Gidrometeoizdat Publ., 1970. 444 p.
9. Kirby C.S., Cravotta III C.A. Net alkalinity and net acidity 1: theoretical considerations. *Applied Geochemistry*, 2005, vol. 20, no. 10, pp. 1920–1940.

10. Yuzhanina A.A., Kremleva T.A. Vliyanie genezisa malykh rek Nadymskogo rayona na khimicheskiy sostav vod i ekologicheskoe sostoyanie [Influence of the genesis of small rivers of the Nadym region on the chemical composition of waters and the ecological state]. *Biogeokhimiya khimicheskikh elementov i soedineniy v prirodnykh sredakh. Materialy III Mezhdunarodnoy shkoly-seminara molodykh issledovateley* [Biogeochemistry of chemical elements and compounds in natural environments: materials of the III International School-Seminar for Young Researchers]. Tyumen, April 23–28, 2018. pp. 206–212.
11. Moiseenko T.I., Dinu M.I., Gashkina N.A., Kremleva T.A., Khoroshavin V.Y. Geochemical patterns of the distribution of elements in the waters of lakes in the arctic regions. *Geochemistry*, 2020, vol. 65, no. 6, pp. 521–532. In Rus.
12. Pettit C.M., Scharer J.M., Chambers D.B., Halbert B.E., Kirkaldy J.L., Bolduc L. Neutral mine drainage. *Proceedings of Mining and the Environment*. Sudbury, Canada, 1999. pp. 829–838.
13. *PND F 16.1.8-98. Kolichestvenny khimicheskiy analiz pochv. Metodika vypolneniya izmereniy massovoy kontsentratsii ionov nitrita, nitrata, khlorida, ftorida, sulfata i fosfata v probakh pochv (vodorastvorimaya forma) metodom ionnoy khromatografii* [PND F 16.1.8-98. Quantitative chemical analysis of soils – a technique for measuring the mass concentration of ions of nitrite, nitrate, chloride, fluoride, sulfate and phosphate in soil samples (water-soluble form) by ion chromatography]. Moscow, AnalitInvest Publ., 1998. 25 p.
14. *PND F 16.1:2.21-98. Kolichestvenny khimicheskiy analiz pochv. Metodika vypolneniya izmereniy massovoy doli nefteproduktov v probakh pochv i gruntov fluorimetricheskim metodom s ispolzovaniem analizatora zhidkosti «Flyuorat-02»* [PND F 16.1:2.21-98. Quantitative chemical analysis of soils. Technique for measuring the mass fraction of petroleum products in soil and soil samples by the fluorimetric method using the fluid analyzer «Fluorat-02»]. Moscow, Lumex Publ., 1998. 22 p.
15. *PND F 16.1.2.3:3.44-05. Metodika vypolneniya izmereniy massovoy doli letuchikh fenolov v probakh pochv, osadkakh stochnykh vod i otkhodov fotometricheskim metodom posle otgonki s vodyanym parom* [PND F 16.1.2.3:3.44-05. Method for measuring the mass fraction of volatile phenols in soil samples, sewage sludge and waste by the photometric method after distillation with water vapor]. Moscow, Federalnaya sluzhba po ekologicheskomu, tekhnologicheskomu i atomnomu nadzoru Publ., 2005. 17 p.
16. *PND F 16.1:2:2.2:3.66-10. Kolichestvenny khimicheskiy analiz pochv. Metodika izmereniy massovoy doli anionnykh poverkhnostno-aktivnykh veshchestv v probakh pochv, gruntov, donnykh otlozheniy, ilov, otkhodov proizvodstva i potrebleniya ekstraktsionno-fotometricheskim metodom* [PND F 16.1:2:2.2:3.66-10. Quantitative chemical analysis of soils. Methods for measuring the mass fraction of anionic surfactants in samples of soils, grounds, bottom sediments, silts, production and consumption wastes by the extraction-photometric method]. Moscow, Federalnaya sluzhba po ekologicheskomu, tekhnologicheskomu i atomnomu nadzoru Publ., 2010. 20 p.
17. *MU 2.1.7.730-99. Metodicheskie ukazaniya. 2.1.7. pochva, ochistka naselennykh mest, bytovye i promyshlennye otkhody, sanitarnaya okhrana pochvy. Gigienicheskaya otsenka kachestva pochvy naselennykh mest* [Methodical instructions. 2.1.7. soil, cleaning of populated areas, household and industrial waste, sanitary protection of soil. Hygienic assessment of soil quality in populated areas]. Moscow, Radon Publ., 1999. 20 p.
18. Skipin L.N., Galyamov A.A., Gaevaya E.V., Zakharova E.V. Ekologicheskaya otsenka sostoyaniya pochvennogo pokrova olenikh pastbishch poluostrova Yamal [Environmental assessment of the state of the soil cover of reindeer pastures on the Yamal Peninsula]. *Vestnik Krasnoyarskogo gosudarstvennogo agrarnogo universiteta*, 2016, no. 12, pp. 194–202.
19. Kukushkin S.Y., Opekunova M.G., Opekunov A.Y. Otsenka zagryazneniya tundrovykh pochv na uchastkakh poiskovo-otsenochnogo bureniya (Yamalo-Nenetskiy avtonomny okrug) [Assessment of pollution of tundra soils in areas of prospecting and appraisal drilling (Yamalo-Nenets Autonomous Okrug)]. *Otkhody, prichiny ikh obrazovaniya i perspektivy ispolzovaniya. Sbornik nauchnykh trudov po materialam Mezhdunarodnoy nauchnoy ekologicheskoy konferentsii* [Waste, reasons for their formation and prospects of use. Collection of scientific articles based on materials from International scientific ecological conference]. Ed. by I.S. Belyuchenko. Krasnodar, KubGAU Publ., 2019. pp. 325–328.
20. Alekseev I.I., Dinkelaker N.V., Oripova A.A., Semina G.A., Morozov A.A., Abakumov E.V. Assessment of the ecotoxicological state of soils in the Polar Urals and South Yamal. *Hygiene and sanitation*, 2017, vol. 96, no. 10, pp. 941–945. In Rus.

*Received: 1 December 2021.*

**Information about the authors**

***Rustam I. Timshanov***, Cand. Sc., head of the department, Trofimuk Institute of Petroleum Geology and Geophysics SB RAS, West Siberian Branch.

***Roman A. Kolesnikov***, Cand. Sc., head of the sector, Governmental State Institution of the Yamal-Nenets Autonomous District «Scientific Center for Arctic Studies».

***Evgeniya N. Morgun***, Cand. Sc., leading researcher, Governmental State Institution of the Yamal-Nenets Autonomous District «Scientific Center for Arctic Studies».

***Aleksey V. Edelev***, Cand. Sc., leading researcher, Trofimuk Institute of Petroleum Geology and Geophysics SB RAS.

***Nataliya V. Yurkevich***, Cand. Sc., head of the department, Trofimuk Institute of Petroleum Geology and Geophysics SB RAS.

***Tatyana A. Kuleshova***, junior researcher, Trofimuk Institute of Petroleum Geology and Geophysics SB RAS.

УДК 669.053.4

# ОБЗОР СОВРЕМЕННЫХ ТЕХНОЛОГИЙ ПЕРЕРАБОТКИ УПОРНЫХ ЗОЛОТОСОДЕРЖАЩИХ РУД И КОНЦЕНТРАТОВ С ПРИМЕНЕНИЕМ АЗОТНОЙ КИСЛОТЫ

**Гордеев Даниил Валерьевич**[1],
danya.gordeev.2014@mail.ru

**Петров Георгий Валентинович**[1],
petroffg@yandex.ru

**Хасанов Артур Вячеславович**[1],
khasanov-a@gidrometall.ru

**Северинова Ольга Валерьевна**[1],
argentumhelga@gmail.com

[1] Санкт-Петербургский Горный университет,
Россия, 199106, г. Санкт-Петербург, 21-я лин. В.О., 2.

***Актуальность.*** *Упорность золотосодержащих руд обусловлена двумя факторами: первый заключается в тонкой диспергации золота в сульфидных минералах, второй – в наличии углеродистого вещества, ответственного за протекание процесса прег-роббинга, приводящего к неизбежному снижению извлечения золота. В современной золотоизвлекательной промышленности существует множество способов переработки упорного золота с содержанием углеродистого вещества до 1 %, однако более высокие его концентрации до сих пор вызывают большие проблемы. Одним из наиболее интересных и перспективных способов минимизации влияния углерода на извлечение золота является использование азотной кислоты, поскольку данный реагент может, с одной стороны, интенсифицировать процесс окисления или удаления углеродистого вещества, а с другой – запассивировать его поверхность и таким образом значительно снизить сорбционную активность углеродистого вещества. Актуальность данной работы обусловлена отсутствием в современной золотоизвлекательной промышленности технологии, позволяющей перерабатывать высокоуглеродистое сырье и перспективностью применения азотной кислоты в гидрометаллургии золота.*

***Цель*** *работы заключалась в обосновании значимости применения азотной кислоты в технологии автоклавного окисления упорных золотосодержащих концентратов.*

***Результаты.*** *Проведен обзор современных методов переработки упорного золота, выявлены основные преимущества и недостатки каждого. Установлено, что ни один из методов не позволяет эффективно перерабатывать высокоуглеродистое сырье из-за невысокой степени оксиления/пассивации углеродистого вещества, которое ответственно за протекание процесса прег-роббинга. В работе представлены технологии переработки золотосодержащего сырья в азотнокислых средах, показано, что азотная кислота может использоваться не только как основной окислитель, но также и как катализатор химических реакций окисления и пассиватор поверхности углеродистого вещества. Описанные в работе уникальные свойства азотной кислоты могут быть успешно применены в автоклавной гидрометаллургии золота.*

***Ключевые слова:***
*Упорные золотосодержащие руды, автоклавное окисление, биовыщелачивание, окислительный обжиг, азотнокислые технологии, нитрат-ионы, органический углерод, углеродистое вещество, прег-роббинг.*

## Введение

В мировом минерально-сырьевом комплексе намечается тенденция роста дисбаланса между добычей и приростом балансовых запасов золотосодержащих руд, что создаёт серьёзную проблему для развития экономики. Истощение запасов легкообогатимого сырья вынуждает золотодобывающие компании осваивать технологии переработки руд упорных месторождений [1, 2].

В настоящее время более 20 % всех известных в мире запасов золотосодержащих руд представляют собой так называемые «упорные» руды [1–3]. Сегодня золотодобывающие компании сталкиваются с кризисом запасов, и то, что осталось в недрах, становится все сложнее обрабатывать.

Запасы упорного золота, требующие более сложных методов обработки для достижения степени извлечения оксидной руды, соответствуют 24 % текущих запасов золота и 22 % ресурсов золота во всем мире [2]. Несмотря на то, что эти руды имеют более высокое содержание, их можно обрабатывать только с использованием специальных методов предварительной обработки.

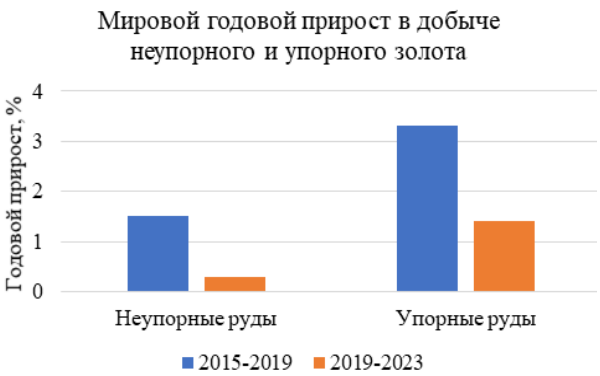



***Рис. 1.*** *Годовой прирост в добыче неупорного и упорного золота [4]*

***Fig. 1.*** *Annual growth in non-refractory and refractory gold production [4]*



DOI 10.18799/24131830/2022/1/3228

Согласно анализу McKinsey [4] в ближайшем будущем ожидается, что добыча на месторождениях упорных руд будет расти более высокими темпами, чем добыча на месторождениях неупорных руд (рис. 1). Современные технологии позволяют извлекать в среднем до 95 % золота из упорных руд, однако ухудшение качества сырья может негативно сказаться на степени извлечения драгоценного металла. Таким образом, необходимо постоянное совершенствование существующих методов и разработка новых технологий, позволяющих извлекать ценные компоненты с максимальной выгодой.

### Причины упорности золота

Основным фактором упорности золотосодержащих руд и концентратов является тонкая диспергация золота в сульфидных минералах, наиболее часто в пирите и арсенопирите. Довольно часто такое сырье также содержит природное органическое углеродистое вещество (УВ), которое способно поглощать растворенные комплексы золота из раствора. Это процесс называется прег-роббингом (preg-robbing) [5, 6]. Наличие УВ придаёт сульфидным золотосодержащим концентратам дополнительную упорность. Такие концентраты часто называют сырьём двойной упорности. Следует отметить, что УВ в каждом материале сильно различается по своей структуре и сорбционным свойствам, наличие органического углерода в руде или концентрате еще не означает потери золота на цианировании.

#### Первая причина упорности – золото в сульфидах

Золото, содержащееся в сульфидах, обычно называют «невидимым золотом». Это связано с тем, что его очень трудно обнаружить с помощью оптической микроскопии или сканирующей электронной микроскопии (SEM). Пирит ($FeS_2$) является основным золотосодержащим сульфидом этих руд и часто встречается вместе в арсенопиритом (FeAsS). Связь с мышьяком является ещё одним фактором, обуславливающим упорность руды, поскольку наличие мышьяка может вызвать трудности при переработке из-за потенциальных экологических проблем [5]. На рис. 2 показан пример инкапсуляции золота в сульфиды, которая способствует упорности руды.

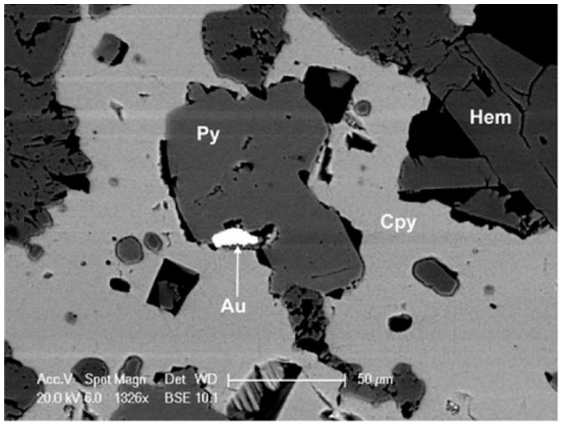



***Рис. 2.*** *Пример инкапсуляции золота в сульфидах [5]*
***Fig. 2.*** *Example of gold encapsulation in sulphides [5]*

Прямое цианирование таких материалов дает извлечение на уровне 2–50 %. В кристаллической структуре пирита и арсенопирита атомы золота замещают атомы «хозяев» в узлах кристаллической решетки минерала и находятся в дефектах решетки или ее междуузлиях [6]. Таким образом, для того чтобы добыть такое золото, необходимо разрушить кристаллическую решетку минерала.

Спецификой существования частиц золота в кристаллической решётке указанных минералов являются малые размеры их частиц, сопоставимые с размером атомов. В результате эти частицы сильно различаются по физическим и химическим свойствам от более крупных частиц. Одним из проявлений этих различий является большая склонность к окислению по сравнению с компактным металлическим золотом. Принципиально высвободить золото и перевести его в форму, доступную для цианирования, можно путём окисления матрицы минерала, которое достигается автоклавным или биологическим методами, а также обжигом.

Многие сульфидные концентраты после практически полного автоклавного окисления при температуре окисления 200 °C показывают извлечение золота при последующем цианирования на уровне 94–98 %. Подобные золотосодержащие сульфидные материалы называются упорными. Если же в составе перерабатываемого материала присутствует так называемый органический углерод, автоклавное окисление концентрата происходит полностью, но последующее извлечение золота при цианировании полученного продукта падает на 5–50 % по сравнению с обычными упорными концентратами. Руды и концентраты, обладающие подобными признаками упорности, называют дважды упорными.

#### Вторая причина упорности – наличие органического углерода

В случае некоторых руд извлечение золота путём цианирования ограничивается присутствием встречающегося в природе углеродистого материала, который адсорбирует золото из цианидного раствора. Чаще всего такие руды относят к материалам с эффектом прег-роббинга. Впервые Смит использовал термин «прег-роббинг» в 1968 г. [7], а позже его использовали и другие учёные и инженеры. Сейчас он широко используется в золотодобывающей промышленности. Прег-роббинг – важное явление, которое препятствует извлечению золота из-за присутствия природного УВ. Оно было обнаружено ещё в 1911 г. Коузом, который понял, что потери золота в хвостохранилищах месторождения Вайхи-Паерола в Новой Зеландии были связаны с присутствием в руде органического углерода [8].

Минералогия, связанная с углеродистыми золотосодержащими рудами, может сильно отличаться в зависимости от месторождения [9]. Составляющие руды, отвечающие за прег-роббинг, обычно представляют собой углеродсодержащие материалы, такие как древесная щепа, некарбонатный углерод, или другие компоненты, в особенности природный углерод в элементной форме [10]. Углеродистый материал

встречается во многих месторождениях по всему миру. Он образуется в результате твердофазного метаморфического преобразования органического материала, первоначально находившегося в контакте с горной породой. Это превращение называется графитизацией и зависит от температуры, давления и типа предшественника углерода.

Присутствие углеродистого вещества в руде не обязательно приводит к низкому извлечению золота. Похоже, что углерод может существовать в руде в различных формах, которые проявляют различное сродство к растворенному золото-цианидному комплексу. Считается, что природный углерод в углеродистой руде ведёт себя так же, как активированный уголь, при контакте с растворами ауро-цианидов.

Органический углерод, присутствующий во многих золотосодержащих рудах и входящий в состав углеродистого вещества этих руд, как правило, соотносят с тремя основными типами или группами химических соединений:

- кероген;
- углеводороды;
- гуминовые кислоты.

Углеводороды и гуминовые кислоты находят и выделяют из рудного УВ весьма редко и в небольших количествах. При этом отмечают, что углеводороды практически не проявляют сорбционных свойств по отношению к комплексам золота. Гуминовые кислоты, напротив, способны сорбировать золото за счёт функциональных групп.

Основным типом УВ является группа химических соединений, которую можно обозначить как «кероген».

В частности, собственно «керогеном» и аморфным углеродом, очевидно, называют слабопреобразованную фракцию керогена. По мере метаморфизации керогена в ходе геохимических процессов (диагенеза и катагенеза) он теряет функциональные группы, водород и кислород, его структура упорядочивается и становится более кристаллической. В таком случае полученный органический углерод характеризуют как ароматический С (сравнивая его с антрацитом), кристаллический С, графитный С, углерод типа активированного угля.

Активным – с точки зрения технологии производства золота – является углерод со слаборазвитой кристаллической структурой (аморфный) или же, напротив, сильно преобразованный углерод, но имеющий специфические функциональные группы (преимущественно, кислородсодержащие) или дефекты кристаллической решётки.

Как правило, органический углерод находится в металлургических пробах в рассеянном виде. Его содержание варьируется от десятых долей процента до нескольких процентов и редко превышает 10 % в рудах и концентратах. К числу наиболее распространённых углеродсодержащих месторождений золота относят, например, руды Карлинского тренда в Неваде, а в РФ и ближнем зарубежье это так называемые «чёрные сланцы» [11].

**Современные технологии переработки упорного золота**

Для переработки таких материалов применяются следующие технологии:

*Окислительный обжиг* материала при температурах от 400 до 800 °С [5, 6]. Данный способ считается первой технологией переработки упорных золотосодержащих концентратов. Извлечение золота варьируется в интервале от 80 до 90 %. Технология отличается относительной простотой, низкими затратами в случае автогенности процесса и возможностью удаления (выжигания) органического углерода. Однако известны случаи, когда происходила, наоборот, активация поверхности углерода, которая приводила ещё к большим потерям золота на последующем цианировании. К недостаткам технологии относятся высокое содержание токсичных веществ в отходящих газах, особенно при переработке сырья с высоким содержанием мышьяка, сурьмы или ртути; возможность спекания частиц, которое ведёт к снижению извлечения золота и высокие капитальные затраты.

*Бактериальное выщелачивание* (биовыщелачивание). Сегодня биовыщелачивание – это одна из основных технологий переработки упорного золота [8, 9]. В мире существует примерно 20 заводов, работающих по данному методу. На территории Российской Федерации до недавнего времени упорные золотосодержащие руды перерабатывались только по технологии бактериального выщелачивания (месторождение «Олимпиада», компания «Полюс Золото») [12]. Бактериальное окисление проводится при температурах от 30 до 50 °С и контролируемом значении pH. Температура – один из ключевых факторов процесса, поскольку незначительное изменение температуры может привести к гибели бактерий, и их окислительные свойства снижаются. Продолжительность процесса может достигать 5–6 суток [12]. Извлечение золота при биовыщелачивании достигает 95 % [13]. Технология отличается низкими капиталозатратами, отсутствием зависимости от содержания сульфидной серы в исходном сырье (поскольку нет необходимости в поддержании высоких температур). К недостаткам относят образование элементной серы, которая значительно повышает расход цианида при дальнейшей переработке, а также низкую интенсивность процесса.

*Атмосферное окисление* с предварительным сверхтонким измельчением, процесс Albion [9–11, 14]. Технология процесса Albion была разработана в 1994 г. компанией Xstrata PLC и считается запатентованной по всему миру. На сегодняшний день действуют 4 завода, использующих данную технологию. Первый этап процесса Albion – сверхтонкое измельчение концентрата. Большинство сульфидных минералов невозможно выщелачивать при условиях атмосферного давления. Процесс сверхтонкого измельчения приводит к высокой степени деформации (напряжениям) решётки сульфидного минерала. В результате количество трещин на границах зёрен и дефектов решётки в минерале увеличивается на несколько порядков по сравнению с неизмельчёнными минералами.

После тонкого измельчения концентрата пульпа выщелачивается в реакторах, кислород при этом вводится в пульпу выщелачивания для окисления сульфидных минералов. Извлечение золота в процессе Albion достигает 90–95 %. Технология отличается низкой скоростью процесса, образованием элементной серы.

*Автоклавное окисление* [8, 9, 15–20]. Данная технология предполагает окисление упорного золота кислородом под высокими давлением и температурой. Автоклавное окисление применяется для переработки упорных золотосульфидных руд, содержащих пирит, арсенопирит, халькопирит и другие сульфидные минералы. Золото выделяется при последующем цианировании автоклавного кека. Технология позволяет извлекать до 99 % золота, отличается высокой интенсивностью процесса, отсутствием образования элементной серы (все сульфиды окисляются до сульфатов), частичной пассивацией или окислением углерода, а также выделением мышьяка в стабильную водонерастворимую форму скородита. К недостаткам технологии относят высокие капитальные затраты и риск протекания автоклавного прег-роббинга [19, 21].

В таблице **Таблица** представлены основные преимущества и недостатки существующих технологий переработки упорных золотосодержащих руд и концентратов.

***Таблица.*** *Преимущества и недостатки основных технологий переработки упорных золотосодержащих концентратов*
***Table.*** *Advantages and disadvantages of the main technologies for processing refractory gold-bearing concentrates*

| Критерий/Технология<br>Criterion/Technology | Обжиг/Roasting | Биовыщелачивание<br>Bioleaching | Окисление/Oxidation | |
|---|---|---|---|---|
| | | | атмосферное<br>atmosphere | автоклавное<br>pressure |
| Извлечение Au, %<br>Au recovery, % | 80–90 | 80–95 | 90–95 | 90–99 |
| Пассивация/удаление орг. углерода<br>Passivation/removal of org. carbon | Частичное окисление, возможна активация<br>Partial oxidation, activation possible | Частичная пассивация<br>Partial passivation | Отсутствует<br>Absent | Частичное окисление<br>Partial oxidation |
| Образование элементной серы<br>Elemental sulfur formation | Отсутствует<br>Absent | Присутствует<br>Present | Присутствует<br>Present | Отсутствует<br>Absent |
| Интенсивность процесса<br>Process intensity | Высокая<br>High | Низкая<br>Low | Низкая<br>Low | Высокая<br>High |
| Экологичность<br>Environmental friendliness | Низкая<br>Low | Высокая<br>High | Высокая<br>High | Высокая<br>High |
| Капиталоёмкость<br>CAPEX | Высокая<br>High | Низкая<br>Low | Низкая<br>Low | Высокая<br>High |

Информация, представленная в таблице, доказывает востребованность автоклавной технологии по сравнению с другими. По данным Global Mining Research на автоклавный метод приходится 18 % всего добываемого золота в мире.

Все вышеперечисленные технологии переработки упорного золота позволяют практически полностью разрушить сульфидную матрицу и извлечь золото с минимальными потерями (до 99 %).

Однако вторая причина упорности до сих пор представляет собой серьёзную проблему, поскольку наличие активного органического углерода в исходном материале может привести к значительным потерям золота. Особенно данная проблема актуальна в автоклавной гидрометаллургии, где различают два вида прег-роббинга. Первый проявляется в процессе автоклавного окисления и представляет собой сорбцию золото-хлоридного комплекса на поверхности УВ, поскольку в автоклавных условиях при наличии в пульпе хлорид-иона золото способно растворяться с образованием ауро-хлоридных комплексов, которые затем поглощаются УВ, данный вид прег-роббинга в литературе называется хлоридным или автоклавным. Второй вид прег-роббинга происходит при цианировании, где золото-цианидный комплекс также сорбируется на поверхности УВ. Сорбированное золото в обоих видах прег-роббинга уходит в хвосты и не извлекается.

Таким образом, в автоклавной технологии проблема прег-роббинга наиболее актуальна, поскольку другие методы переработки упорного золота предполагают либо значительное окисление, т. е. удаление, органического углерода (обжиг), либо частичное окисление с пассивацией его поверхности (биовыщелачивание, азотнокислая переработка).

На сегодняшний день для борьбы с органическим углеродом в золотосодержащих концентратах существует множество способов: цианирование с использованием сорбентов (процесс CIL/RIL); термическая обработка концентрата или кека автоклавного выщелачивания [22, 23]; очистка воды от хлора; повышение температуры автоклавного окисления (до 250 °C) и времени пребывания материала в автоклаве [24]; добавки солей серебра и ртути для связывания ионов хлора в автоклавном растворе [25]; использование окислителей для окисления углерода и пассивации его поверхности [26]; использование поверхностно-активных добавок, которые снижают адсорбционную способность углерода [27, 28]; тиосульфатное выщелачивание [29]; каталитическое добавление ионов меди [30].

Одним из наиболее интересных и перспективных вышеперечисленных способов в снижении сорбционной активности углерода является его пассивация растворами азотной кислоты [25], поскольку, с одной стороны, азотная кислота может быть использована для пассивации поверхности, а с другой – для окис-

ления углерода. В рамках данной статьи будет рассмотрена возможность использования азотной кислоты для снижения степени автоклавного и цианидного прег-роббинга.

### Использование $HNO_3$ для переработки упорных золотосодержащих концентратов

#### Азотнокислое выщелачивание золотосодержащих концентратов

Применение азотнокислых растворов при выщелачивании сульфидов цветных металлов характеризуется высокими значениями окислительного потенциала, что выгодно отличает азотную кислоту от более распространённых серно- и солянокислых реагентов. Азотная кислота в данном случае – это уникальный реагент, поскольку может быть не только окислителем, но и катализатором реакции окисления.

К наиболее известным технологиям переработки сульфидных золотосодержащих материалов относят Nitrox, Redox.

При азотнокислом выщелачивании сульфидов цветных металлов с последующей регенерацией азотной кислоты в общем виде протекают следующие типовые реакции:

$$MeS+8HNO_3=Me(NO_3)_2+H_2O+NO_{(g)}+SO_4^{2};$$

Me: Cu, Pb, Zn, Ag и т. д.;

$$2FeS_2+10HNO_3\rightarrow 2Fe^{3+}+2H^{+}+4SO_4^{2-}+10NO+4H_2O;$$

$$3FeAsS+12HNO_3\rightarrow 3FeAsO_4+4H^{+}+2SO_4^{2-}+4H_2O+S+12NO.$$

Результаты лабораторных исследований по азотнокислому выщелачиванию сульфидных материалов представлены в работах [31, 32]. В статье [32] исследовалось влияние предварительной азотнокислой обработки упорного золотосульфидного концентрата, содержащего 62 г/т золота; 17,9 % сульфидной серы и 0,9 % углерода (карбонатный+органический). Азотнокислое выщелачивание проводилось при температуре 80 °C в течение 150 минут, концентрация азотной кислоты составляла 5 моль/л.

Дальнейшее цианирование проводилось при комнатной температуре в течение 24 часов. Ж:Т пульпы=4, концентрация NaCN=1,5 г/л.

Результаты исследований, представленных в [32], показаны на рис. 3.

На рисунке показано, что прямое цианирование в течение 24 часов позволяет извлечь лишь 40 % золота, что подтверждает факт упорности материала. Предварительная обработка азотной кислотой способствует увеличению извлечения золота до 99 %. Очевидно, что в описанных технологиях либо органический углерод, входящий в состав концентрата, отличается минимальной сорбционной активностью, либо происходит пассивация его поверхности. Окисление углерода в таких условиях маловероятно. Неясно, как данная технология покажет себя на концентратах, где содержание органического углерода будет более 1 %.

Использование азотной кислоты в качестве основного окислительного агента – хорошо изученный процесс, имеющий свои особенности, связанные с высоким расходом азотной кислоты, выбросом газообразных соединений азота в атмосферу, сложностью организации регенерации кислоты и т. д.

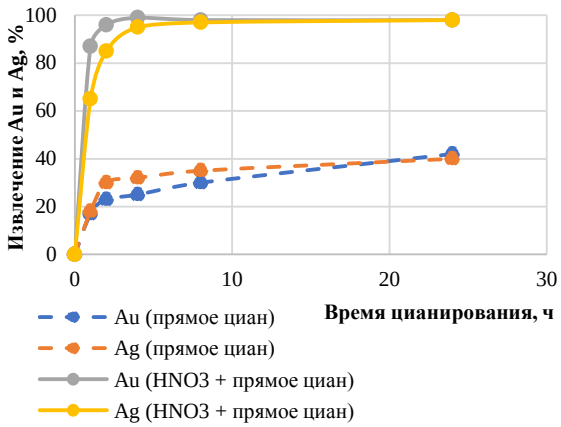



***Рис. 3.*** *Результаты опытов по азотнокислому выщелачиванию [32]*

***Fig. 3.*** *Experiments results of nitric acid leching [32]*

#### Использование $HNO_3$ в качестве катализатора

Также известно, что использование азотной кислоты в качестве катализатора способствует ускорению процесса окисления, одним из примеров таких технологий является NSC [33]. Преимущества данной технологии:

- повышение скорости реакции окисления;
- меньший объем реактора;
- процесс не требует высоких температур и давления;
- за счёт высокого ОВП, который достигается добавлением азотной кислоты, возможно окисление при низком избыточном давлении кислорода;
- низкие капитальные затраты на строительство и обслуживание реактора, поскольку в качестве материала изготовления может быть использована нержавеющая сталь без защитных слоев кислотостойкого кирпича или титана;
- отсутствует риск возгорания титана.

Общепринятая форма реакция окисления сульфидов серной кислотой в соединении с азотной выглядит следующим образом:

$$3MeS_{(s)}+2HNO_{3(aq)}+3H_2SO_{4(aq)}\rightarrow$$
$$\rightarrow 3MeSO_4+3S^0_{(s)}+2NO_{(g)}+4H_2O. \quad (1)$$

Однако считается, что реакционной формой является $NO^+$ вместо $NO_3^-$. Добавка ионов $NO_2^-$ ускоряет процесс образования $NO^+$. В качестве источников $NO_2^-$ могут быть использованы нитриты калия, натрия.

Как показано в реакции (1) в процессе окисления сульфидов образуется газ NO. Данный газ имеет лимитированное значение растворимости в воде, ввиду чего перемещается из раствора. В закрытом реакторе в условиях избыточного давления кислорода происходят следующие реакции:

$$2NO_{(g)}+O_{2(g)}\leftrightarrow 2NO_{2(g)};$$
$$2NO_{2(g)}\leftrightarrow 2NO_{2(aq)};$$

$$2NO_{2(aq)}+2NO_{(aq)}+4H^{+}\leftrightarrow NO^{+}_{(aq)}+2H_2O$$

Поскольку соединения азота в процессе окисления регенерируются, их роль в суммарной реакции как фактического окислителя неочевидна. Общая суммарная реакция (2) представляет собой взаимодействие сульфидного минерала с раствором кислоты, в результате которой образуются растворимые сульфаты и некоторые количества элементарной серы. Конечно, при более высоких температурах и/или концентрациях азотной кислоты сульфид будет полностью окисляться до сульфата.

$$2MeS_{(s)}+4H^{+}+O_{2(g)}\rightarrow 2Me^{2+}_{(aq)}+2S^{0}+2H_2O. \quad (2)$$

Промежуточные продукты азота служат подходящим средством для переноса кислорода к поверхности твёрдых частиц и позволяют полученной реакции протекать с повышенным окислительно-восстановительным потенциалом. Это уникальное явление исключает использование высоких температур и высоких давлений. В таких процессах в качестве корпуса реактора может быть использована обычная нержавеющая сталь. Таким образом, быстрая кинетика системы приводит к меньшим объёмам реактора и более высокой производительности. 99,9 % видов азота, используемых в системе выщелачивания, утилизируются в газовой фазе и легко разрушаются и удерживаются коммерчески доступными системами скрубберов. Таким образом, воздействие на окружающую среду сводится к минимуму, и растворы автоклавного выщелачивания практически не содержат азота.

Технология NSC была промышленно применена на медно-серебряном концентрате на металлургическом комплексе Sunshine [34]. Исходный химический состав перерабатываемого концентрата: 24 % Cu; 4 % Ag; 35 % S.

Выщелачивание велось в два этапа, предварительная обработка проводилась при температуре 50 °C и концентрации серной кислоты 200 г/л. Далее полученная пульпа направлялась на вторую стадию окисления в автоклавных условиях при температуре 155 °C, давлении кислорода 4 бара, концентрация нитрат ионов в исходной пульпе, поступающей на АОВ, составляла 2 г/л.

Извлечение меди и серебра в раствор составило 99 и 96 %, соответственно.

Также технология NSC была опробована на упорных золотосульфидных рудах, которые представлены преимущественно халькопиритом [35]. Содержание золота в исходном концентрате составляло 16,3 г/т; серебра 320,3 г/т. Содержание серы 36 %, меди 25 %.

Выщелачивание проводили при начальной концентрации серной кислоты 175 г/л. Температура процесса 125 °C, парциальное давление кислорода 5 бар. Добавка нитрат ионов 2 г/л. Продолжительность выщелачивания составляла 25 минут.

В результате выщелачивания серебро переходило в раствор на 97 %, медь на 99,5 %, железно на 97 %. Золото, которое затем извлекалось путём окисления серы в щелочной среде, концентрировалось в сульфидных гранулах. Сульфидная сера при таких условиях окислялась преимущественно до элементарного состояния (степень извлечения элементарной серы 83,7 %).

В патенте [36] представлен способ переработки уранового концентрата в серной кислоте с добавлением каталитического количества азотной кислоты. Добавка $HNO_3$ способствовала смягчению условий выщелачивания упорных минералов до температур 130–140 °C. Смягчение условий было возможно за счет снижения энергии активации процессов окисления. Выделяющиеся в процессе окисления оксиды азота далее окислялись кислородом с образованием азотной кислоты:

$$2NO+3/2O_2+H_2O\rightarrow 2HNO_3;$$

$$2NO+1/2O_2+H_2O\rightarrow 2HNO_2+O_2\rightarrow 2HNO_3$$

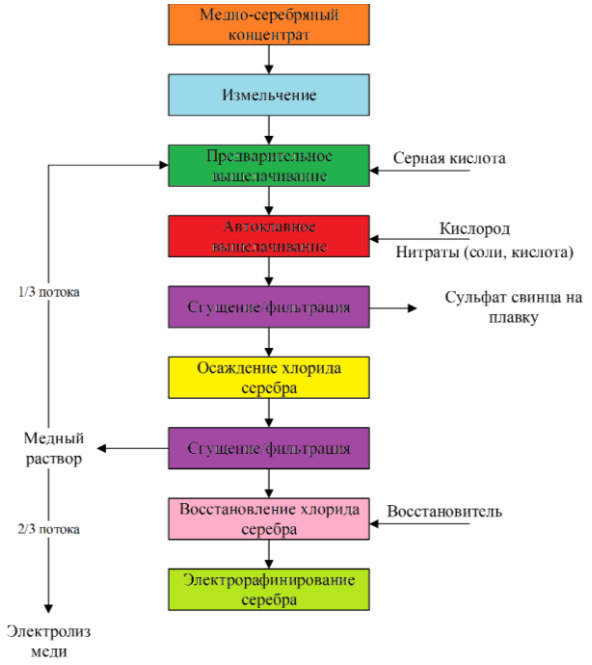



***Рис. 4.*** *Технологическая схема переработки медно-серебряного концентрата на комбинате Sunshine [34]*

***Fig. 4.*** *Technological processing scheme of copper-silver concentrate at the Sunshine plant [34]*

При этом $HNO_3$ регенерируется прямо в реакторе, и процесс протекает без выделения оксидов азота в атмосферу.

В работе [37] каталитическое действие азотной кислоты исследовалось на молибденовых концентратах. Как утверждают авторы, химизм процессов окисления молибденовых минералов аналогичен реакции (2). Добавка 11 % азотной кислоты (от исходной массы сухого концентрата) позволила сократить рабочую температуру процесса с 240 до 180 °C и избыточное давление кислорода с 4,4 до 2,5 МПа без потерь по извлечению молибдена в раствор и автоклавный кек. Испытания проводились на пилотной автоклавной установке, состоящей из 4 автоклавов по 25 литров.

Таким образом, технологии с использованием азотной кислоты в качестве катализатора доказали свою эффективность и нашли широкое применение в металлургии цветных и благородных металлов.

### Пассивация углеродистого вещества азотной кислотой

Азотная кислота не только позволяет снизить энергию активации реакции окисления, но также способствует пассивации УВ, которое может оказывать негативный эффект на золотосульфидные руды и концентраты. Данное явление было описано в работе [8].

Поверхностные комплексы кислорода образуются на активированных углях, когда они обрабатываются окислителями либо в газовой фазе, либо в растворе. В результате обработки образуются три типа поверхностных оксидов: кислотный, основной и нейтральный. Одним из способов введения преимущественно кислых поверхностных оксидов, то есть карбоксильных, фенольных и лактонных групп, является обработка активированных углей различными окислительными растворами. В дополнение к этим кислотным группам также вводятся основные и нейтральные поверхностные группы, которые выделяют CO после нагревания при высокой температуре. Фиксация кислотных групп на поверхности активированных углей делает их более гидрофильным, снижает их pH в точке нулевого заряда и увеличивает отрицательный поверхностный заряд в течение некоторого времени. В то же время вышеуказанные обработки могут повлиять на площадь поверхности и текстуру пор активированных углей.

В работе [38] исследуется механизм пассивации активированного углерода за счет предварительной обработки азотной кислотой, которая позволила снизить количество и размер пор активированного угля и сорбционную активность. Предварительная обработка проводилась следующим образом: 1 г активированного углерода обрабатывался 10 мл концентрированной азотной кислоты при 80 °C до полной выпарки азотной кислоты. В работе доказано, что в процессе азотнокислой обработки на поверхности углерода фиксируются молекулы кислорода, которые блокируют дальнейшую сорбцию золота.

В работе [39] показано, что обработка азотной кислотой позволяет снизить сорбционную активность активированного углерода с 87 до 22 %. Поскольку активное углеродистое вещество в золотосодержащих рудах химически эквивалентно активированному углю, ожидается, что уменьшение адсорбции золота, наблюдаемое для активированного угля, обработанного азотной кислотой, также будет иметь место в случае углеродистого вещества в руде/концентрате.

### Заключение

Азотная кислота не только позволяет ускорить процесс окисления, но также пассивирует поверхность органического углерода, содержащегося в исходном материале. Эти свойства могут быть успешно использованы в металлургии упорных золотосульфидных руд и концентратов.

Технологии переработки упорных золотосодержащих концентратов с использованием азотной кислоты в качестве основного окислителя широко не востребованы ввиду высокого расхода азотной кислоты, необходимости ее регенерации и утилизации токсичных газов. Методы переработки в смесях азотной и серной кислот, где $HNO_3$ выступает в качестве катализатора химической реакции окисления сульфидов, отличаются множеством преимуществ, однако вопрос пассивации или окисления органического углерода, ответственного за прег-роббинг, остаётся открытым.

Автоклавные технологии переработки упорного золота сегодня применяются наиболее часто, до 18 % от всех методов извлечения золота. Автоклавное окисление позволяет практически полностью разрушить сульфидную матрицу (до 99,9 %) и высвободить золото, однако степень окисления углерода при этом невысокая. Использование азотной кислоты в качестве вторичного окислителя теоретически может решить проблему прег-роббинга либо за счёт пассивации его поверхности, либо за счёт его окисления.

### СПИСОК ЛИТЕРАТУРЫ

1. Лоза А.И. Обзор золотодобывающей отрасли России по итогам 2019 года – первого полугодия 2020 года // Союз золотопромышленников. – 2020. – № 1. – С. 1–62.
2. Motta G., Polcyn M., Saragosa E. Refractory gold ores: challenges and opportunities for a key source of growth // MineSpans Commentary. – 2021. – № 6. – P. 1–6.
3. Лодейщиков В.В. Состояние и тенденции развития технологии извлечения золота из упорных руд и концентратов // Цветная металлургия. – 1993. – № 2. – С. 4–9.
4. Goode J.R. Refractory gold ore: cause, processes, testing and plants // Proceedings Annual SME Conference. – Colorado, 1993. – P. 82–93.
5. Воробьев-Десятовский Н.В., Епифанов А.В. Автоклавное окисление дважды упорных золотосодержащих руд. Проблемы и пути решения // Минерально-сырьевой комплекс России – новые рубежи и вызовы: 10 Горнопромышленный форум. МАЙНЕКС Россия 2014. – М., 2014. – С. 1–8.
6. Aleksandrova T.N., Heide G., Afanasova A.V. Assessment of refractory gold-bearing ores based of interpretation of thermal analysis data // Journal of Mining Institute. – 2019. – № 235. – P. 30–37.
7. Rees K.L., Deventer V. Preg-robbing phenomena in the cyanidation of sulfide gold ores // Hydrometallurgy. – 2000. – № 58. – P. 61–80.
8. Miller J. D., Wan R.-Y., Díaz X. Preg-robbing gold ores // Gold Ore Processing. – 2016. – V. 15 – P. 885–907.
9. Adams M.D. Summary of gold plants and processers // Advances in gold ore processing. – 2005. – V. 15 – P. 994–1013.
10. Albion process // Albion Process: simplicity in leaching. 1994. URL: https://www.albionprocess.com/ru/about/Pages/oxidative-leaching.aspx (дата обращения: 20.05.2021).
11. Commissioning and ramp-up of the Albion process at the GPM gold project / P. Voigt, M Hourn., D. Mallah, D. Turner // MetPlant 2015. – Perth, 2015. – P. 207–219.
12. Miller P., Brown A. Bacterial oxidation of refractory gold concentrates // Developments in Mineral Processing. – 2005. – № 15. – P. 371–402.
13. Bulaev A.G., Boduen A.Y., Ukraintsev I.V. Biooxidation of persistent gold-bearing ore concentrate of the Bestobe deposit // Obogashchenie Rud. – 2019. – № 6. – P. 9–14.
14. Boduen A.Y., Fokina S.B., Polezhaev S.Y. The hydrometallurgical pretreatment of a refractory gold sulfide concentrate // Innovation-Based Development of the Mineral Resources Sector: Challenges and Prospects – 11th conference of the Russian–German Raw Materials. – St-Petersburg, 2019. – P. 331–340.
15. Масленицкий И.Н. Опыт автоклавного окисления сульфидных золотосодержащих концентратов перед цианированием // Известия вузов. Цветная металлургия. – 1958. – № 4. – С. 103–108.
16. Ласкорин Б.Н., Чугаев Л.В., Москвина Г.И. Автоклавное окисление сульфидно-мышьяковых концентратов // Гидрометаллургия золота. – М.: Наука, 1980. – С. 52–58.

17. Автоклавные процессы переработки золотосодержащих концентратов / Л.В. Чугаев, Я.М. Шнеерсон, М.В. Никитин, Н.Ф. Иванова // Цветные металлы. – 1998. – № 2. – С. 56–60.
18. Thomas K.G. Pressure oxidation overview // Developments in Mineral Processing. – 2005. – № 15. – P. 403–432.
19. Седельникова Г.В. Автоклавное и бактериальное выщелачивание упорных золотосульфидных руд и концентратов. Состояние и перспективы применения в отечественной промышленности // Инновационные процессы комплексной и глубокой переработки минерального сырья. Плаксинские чтения-2013. Материалы Международного совещания. – Томск, 2013. – С. 28–33.
20. Автоклавная гидрометаллургия цветных металлов / С.С. Набойченко, Я.М. Шнеерсон, М.И. Калашникова, Л.В. Чугаев. – М.: ГОУ ВПО УГТУ-УПИ, 2009. – Т. 2. – С. 351–382.
21. Thermophilic Microbial of Precious Metal Ores: US Patent 4729788. – 1988.
22. Применение термической обработки для золотосодержащего сырья двойной упорности / С.И. Лаевский, Я.М. Шнеерсон, Л.В. Чугаев, М.А. Плешков, А.В. Маркелов, С.Ю. Полежаев // Цветные металлы и минералы 2019: сборник докладов. – Красноярск, 2019. – С. 956–963.
23. Полежаев С.Ю., Черемисина О.В. Комплексная технология переработки золотосодержащих концентратов: автоклавное выщелачивание с последующим обжигом // Известия вузов. Цветная металлургия. – 2015. – № 3. – С. 34–39.
24. Высокотемпературное автоклавное окисление сырья двойной упорности / И.В. Фоменко, М.А. Плешков, С.И. Лях, С.И. Лаевский // Цветные металлы. – 2020. – № 9. – С. 110–116.
25. The use of special additives to inhibit preg-robbing of gold in the process of double refractory concentrates pressure oxidation / I.V. Fomenko, M.A. Pleshkov, P.V. Zaytsev, L.V. Chugaev, Y.M. Shneerson // Alta 2016 Gold-PM Session. – Perth, 2016. – P. 231–241.
26. Method to improve recovery of gold from double refractory gold ores: US Patent 8262768B2. – 2012.
27. The use of special additives to inhibit preg-robbing of gold in the process of double refractory concentrates pressure oxidation / I.V. Fomenko, M.A. Pleshkov, P.V. Zaytsev, L.V. Chugaev, Y.M. Shneerson // Alta 2016 Gold-PM Session. – Perth, 2016. – P. 231–241.
28. Flash chlorinationa new process for treatment of refractory sulphide and carbonceous gold ores / K.A. Brunk, G. Ramadorai, D. Seymour, F.P. Traczyk // Proceedings of Randol Gold Forum. – Golden, CO: Randol International Ltd., 1988. – P. 127–129.
29. Adams M.D., Burger A.M. Characterization and blinding of carbonaceous preg-robbers in gold ores // Minerals Engineering. – 1998. – № 11. – P. 919–927.
30. Thiosulfate leaching for gold hydrometallurgy / C. Abruzzese, P. Fornari, R. Massidda, F. Vegliò, S. Ubaldini // Hydrometallurgy. – 1995. – № 39. – P. 265–276.
31. A hydrometallurgical process for the recovery of precious metals from ores: US Patent 05354359. – 1994.
32. Oktay C., Ersin Y.Y., Haci D. A preliminary study on nitric acid pre-treatment of refractory gold/silver ores // 25th International Mining Congress and Exhibition of Turkey (IMCET). – Antalya, 2017. – P. 463–468.
33. Rusalev R.E., Rogozhnikov D.A., Naboichenko S.S. Nitric acid treatment of Olympiada deposit refractory gold-bearing concentrate // International Russian Conference on Materials Science and Metallurgical Technology. – Vladivostok, 2018. – P. 541–546.
34. Anderson C.G. Applications of NSC pressure leaching // Pressure Hydrometallurgy. – 2004. – V. 3 – P. 855–886.
35. Hydrometallurgy at the Sunshine metallurgical complex / J.B. Ackerman, C.G. Anderson, S.M. Nordwick, L.E. Krys // Proceedings of the Fourth International Symposium on Hydrometallurgy. – Litleton, Colorado, SME, 1993. – P. 477–496.
36. Anderson C.G. The application and economics of industrial NSC pressure leaching to copper ores and concentrates // COBRE 2003. – Santiago, 2003. – P. 1–15.
37. Способ переработки упорных урановых содержащих пирит и благородные металлы материалов для извлечения урана и получения концентрата благородных металлов: пат. 2398903 C1, Рос. Федерация; заявл. 30.03.2009; опубл. 10.09.2010, Бюл. № 25. – 16 с.
38. Autoclave leaching of molybdenite concentrates with catalytic additives of nitric acid / K.M. Smirnov, N.A. Raspopov, Y.M. Shneerson, A.Y. Lapin // Russian Metallurgy (Metally). – 2009. – № 7. – P. 588–595.
39. Activated carbon surface modifications by nitric acid, hydrogen peroxide, and ammonium peroxydiate treatments / C. Moreno-Castilla, M.A. Ferro-García, J.P. Joly, I. Bautista-Toledo, F. Carrasco-Marín, J. Rivera-Utrilla // Langmuir. – 1995. – № 11. – P. 4386–4392.
40. Díaz X., Snihvrowych M. MAC's with nitric acid pretreatment. Internal report. – Utah: University of Utah, 2004. – 7 p.

*Поступила 27.06.2021 г.*

**Информация об авторах**

***Гордеев Д.В.***, аспирант кафедры металлургии, Санкт-Петербургский Горный университет.

***Петров Г.В.***, доктор технических наук, профессор кафедры металлургии, Санкт-Петербургский Горный университет.

***Хасанов А.В.***, аспирант кафедры металлургии, Санкт-Петербургский Горный университет.

***Северинова О.В.***, магистрант кафедры металлургии, Санкт-Петербургский Горный университет.

UDC 669.053.4

# REVIEW OF MODERN PROCESSING TECHNOLOGIES OF REFRACTORY GOLD ORES AND CONCENTRATES WITH USE OF NITRIC ACID

**Daniil V. Gordeev**[1],
danya.gordeev.2014@mail.ru

**Georgiy V. Petrov**[1],
petroffg@yandex.ru

**Arthur V. Khasanov**[1],
khasanov-a@gidrometall.ru

**Olga V. Severinova**[1],
argentumhelga@gmail.com

[1] Saint-Petersburg Mining University,
2, 21st Line, Saint-Petersburg, 199106, Russia.

***The relevance.*** *The refractoriness of gold-bearing ores is caused by two factors: the first is the fine dispersion of gold in sulfide minerals, and the second is the presence of carbonaceous matter, which is responsible for the pre-robbing, leading to an inevitable decrease in gold recovery. In the modern gold mining industry, there are many ways to process refractory gold with carbonaceous matter content up to 1 %, but its higher concentrations still cause big problems. One of the most interesting and promising ways to minimize the effect of carbon on gold recovery is the use of nitric acid, since this reagent can, on the one hand, intensify oxidation or removal of carbonaceous matter, and, on the other hand, passivate its surface and, thus, significantly reduce the sorption activity of carbonaceous matter. The relevance of this work is caused by the lack of technology in the modern gold mining industry that allows processing high carbonaceous raw materials and the promising use of nitric acid in gold hydrometallurgy.*

***The aim*** *of the work was to substantiate the importance of using nitric acid in the technology of autoclave oxidation of refractory gold-bearing concentrates.*

***Results.*** *The authors have carried out a review of modern methods of refractory gold processing, the main advantages and disadvantages of each were identified. It was found that none of the methods allows efficient processing of high-carbonaceous raw materials due to the low degree of carbonaceous matter oxidation/passivation, which is responsible for the pre-robbing process. The paper presents technologies for processing gold-bearing raw materials in nitric acid media; it is shown that nitric acid can be used not only as the main oxidant, but also as a catalyst for chemical oxidation reactions and a passivator of the carbonaceous matter surface. The unique properties of nitric acid described in the work can be successfully applied in the autoclave hydrometallurgy of gold.*

***Key words:***
*Refractory gold-bearing ores, autoclave oxidation, bioleaching, oxidative roasting, nitric acid technologies, nitrate ions, organic carbon, carbonaceous matter, preg-robbing.*

## REFERENCES

1. Loza A.I. Overview of the gold mining industry in Russia at the end of 2019 – the first half of 2020. *Union of Gold Producers*, 2020, no. 1, pp. 1– 62. In Rus.
2. Motta G., Polcyn M., Saragosa E. Refractory gold ores: challenges and opportunities for a key source of growth. *MineSpans Commentary*, 2021, no. 6, pp. 1–6.
3. Lodeyshchikov V.V. State and development trends of technology for extracting gold from refractory ores and concentrates. *Nonferrous metallurgy*, 1993, no. 2, pp. 4–9. In Rus.
4. Goode J.R. Refractory gold ore: cause, processes, testing and plants. *Proceedings Annual SME Conference*. Colorado, 1993. pp. 82–93.
5. Vorobiev-Desyatovsky N.V., Epifanov A.V. Avtoklavnoe okislenie dvazdy upornykh zolotosoderzashchikh rud. Problemy i resheniya [Autoclave oxidation of doubly refractory gold-bearing ores. Problems and solutions]. *Mineralno-syrevoy kompleks Rossii – novye rubezhi i vyzovy. 10 Gornopromyshlenny forum. MAJNEKS Rossiya* [10 Mining Forum. Mineral and Raw Materials Complex of Russia – New Frontiers and Challenges. MINEX Russia 2014]. Moscow, 2014. pp. 1–8.
6. Aleksandrova T.N., Heide G., Afanasova A.V. Assessment of refractory gold-bearing ores based of interpretation of thermal analysis data. *Journal of Mining Institute*, 2019, no. 235, pp. 30–37.
7. Rees K.L., Deventer V. Preg-robbing phenomena in the cyanidation of sulfide gold ores. *Hydrometallurgy*, 2000, no. 58, pp. 61–80.
8. Miller J. D., Wan R.-Y., Díaz X. Preg-robbing gold ores. *Gold Ore Processing*, 2016, vol. 15, pp. 885–907.
9. Adams M.D. Summary of gold plants and processers. *Advances in gold ore processing*, 2005, vol. 15, pp. 994–1013.
10. Albion process. *Albion Process: simplicity in leaching*. 1994. Available at: https://www.albionprocess.com/ru/about/ Pages/ oxidative-leaching.aspx (accessed 20 May 2021).
11. Voigt P., Hourn M., Mallah D., Turner D. Commissioning and ramp-up of the Albion process at the GPM gold project. *MetPlant 2015*. Perth, 2015. pp. 207–219.
12. Miller P., Brown A. Bacterial oxidation of refractory gold concentrates. *Developments in Mineral Processing*, 2005, no. 15, pp. 371–402.
13. Bulaev A.G., Boduen, A.Y., Ukraintsev, I.V. Biooxidation of persistent gold-bearing ore concentrate of the Bestobe deposit. *Obogashchenie Rud*, 2019, no. 6, pp. 9–14.
14. Boduen A.Y., Fokina S.B., Polezhaev S.Y. The hydrometallurgical pretreatment of a refractory gold sulfide concentrate. *Innovation-Based Development of the Mineral Resources Sector: Challenges and Prospects – 11th conference of the Russian–German Raw Materials*. St-Petersburg, 2019. pp. 331–340.
15. Maslenitsky I.N. Opyt avtoklavnogo okisleniya sulfidnykh zolotosoderzhashchikh kontsentratov pered tsianirovaniem [Experience of autoclave oxidation of sulfide gold-containing concentrates before cyanidation]. *Izvestiya vuzov. Cvetnatnay metallurgia*, 1958, no. 4, pp. 103–108.
16. Laskorin B.N., Chugaev L.V., Moskvina G.I. Avtoklavnoe okislenie sulfidno-myshyakovykh kontsentratov [Autoclave oxidation of arsenic sulfide concentrates]. *Gidrometallurgiya zolota* [Gold hydrometallurgy]. Moscow, Nauka Publ., 1980. pp. 52–58.

17. Chugaev L.V., Shneerson Ya.M., Nikitin M.V., Ivanova N.F. Avtoklavnoe okislenie sulfidno-myshyakovykhkontsentratov [Autoclave oxidation of gold-containing concentrates]. *Non-ferrous metals*, 1998, no. 2, pp. 56–60.
18. Thomas K.G. Pressure oxidation overview. *Developments in Mineral Processing*, 2005, no. 15, pp. 403–432.
19. Sedelnikova G.V. Avtoklavnoe i bakterialnoe vyshchelachivanie upornykh zolotosulfidnykh rud i kontsentratov. Sostoyanie i perspektivy primeneniya v otechestvennoy promyshlennosti [Autoclave and bacterial leaching of refractory gold sulfide ores and concentrates. State and prospects of application in the domestic industry]. *Innovacionnye protsessy kompleksnoy i glubokoy pererabotki mineralnogo syrya. Plaksinskie chteniya – 2013* [Innovative processes of complex and deep processing of mineral raw materials. Plaksin Readings 2013]. Tomsk, 2013. pp. 28–33.
20. Naboychenko S.S., Shneerson Ya.M., Kalashnikova M.I., Chugaev L.V. *Avtoklavnaya gidrometallurgia tsvetnykh metallov* [Autoclave hydrometallurgy of non-ferrous metals]. Moscow, GOU VPO USTU-UPI Publ., 2009. Vol. 2, pp. 351–382.
21. Hutchins S.R., Davidson J.A., Brierley J.A., Brierley C.L. *Thermophilic Microbial of Precious Metal Ores.* US Patent, no. 4729788, 1988.
22. Laevsky S.I., Shneerson Ya.M., Chugaev L.V., Pleshkov M.A., Markelov A.V., Polezhaev S.Yu. Primenenie termicheskoy obrabotki dlya zolotosoderzhashchego syrya dvoynoy upornosti [The use of heat treatment for gold-bearing raw materials of double persistence]. *Cvetnye metally i mineraly 2019*: sbornik dokladov [Non-ferrous metals and minerals 2019: collection of reports]. Krasnoyarsk, 2019. pp. 956–963.
23. Polezhaev S.Yu., Cheremisina O.V. Integrated technology for processing gold-containing concentrates: autoclave leaching with subsequent roasting. *Russian Journal of Non-Ferrous Metals*, 2015, no. 3, pp. 34–39. In Rus.
24. Fomenko I.V., Pleshkov M.A., Lyakh S.I., Laevsky S.I. High-temperature autoclave oxidation of double refractory raw materials. *Non-ferrous metals*, 2020, no. 9, pp. 110–116. In Rus.
25. Gorain B., Condos P. *Method to improve recovery of gold from double refractory gold ores.* US Patent, no. 8262768 B2, 2012.
26. Fomenko I.V., Pleshkov M.A. Zaytsev P.V., Chugaev L.V., Shneerson Y.M. The use of special additives to inhibit preg-robbing of gold in the process of double refractory concentrates pressure oxidation. *Alta 2016 Gold-PM Session*. Perth, 2016. pp. 231–241.
27. Brunk K.A., Ramadorai G., Seymour D., Traczyk F.P. Flash chlorinationa new process for treatment of refractory sulphide and carbonceous gold ores. *Proceedings of Randol Gold Forum*. Golden, CO, Randol International Ltd, 1988. pp. 127–129.
28. Adams M.D., Burger A.M. Characterization and blinding of carbonaceous preg-robbers in gold ores. *Minerals Engineering*, 1998, no. 11, pp. 919–927.
29. Abruzzese C., Fornari P., Massidda R., Vegliò F., Ubaldini S. Thiosulfate leaching for gold hydrometallurgy. *Hydrometallurgy*, 1995, no. 39, pp. 265–276.
30. Wan R.Y., Le Vier K.M., Clayston R.B. *A hydrometallurgical process for the recovery of precious metals from ores.* US Patent, no. 05354359, 1994.
31. Oktay C., Ersin Y.Y., Haci D. A preliminary study on nitric acid pre-treatment of refractory gold/silver ores. *25th International Mining Congress and Exhibition of Turkey (IMCET)*. Antalya, 2017. pp. 463–468.
32. Rusalev R.E., Rogozhnikov D.A., Naboichenko S.S. Nitric acid treatment of Olympiada deposit refractory gold-bearing concentrate. *International Russian Conference on Materials Science and Metallurgical Technology*. Vladivostok, 2018. pp. 541–546.
33. Anderson C.G. Applications of NSC pressure leaching. *Pressure Hydrometallurgy*, 2004, vol. 3, pp. 855–886.
34. Ackerman J.B., Anderson C.G., Nordwick S.M., Krys L.E. Hydrometallurgy at the Sunshine metallurgical complex. *Proceedings of the Fourth International Symposium on Hydrometallurgy*. Litleton, Colorado, SME, 1993. pp. 477–496.
35. Anderson C.G. The application and economics of industrial NSC pressure leaching to copper ores and concentrates. *COBRE 2003*. Santiago, 2003. pp. 1–15.
36. Shatalov V.V., Kurkov A.V., Nikonov V.I., Boldyrev V.A., Smirnov K.M., Pastukhova I.V., Menshikov Yu.A., Gushchina R.P. *Sposob pererabotki upornykh uranovykh soderzhashchikh pirit i blagorodnye metally materialov dlya izvlecheniya urana i polucheniya kontsentrata blagorodnykh metallov* [A method of processing refractory uranium containing pyrite and precious metals for the extraction of uranium and the production of a concentrate of precious metals]. Patent RF, no. 2 398 903 C1, 2009.
37. Smirnov K.M., Raspopov N.A., Shneerson Y.M., Lapin A.Y. Autoclave leaching of molybdenite concentrates with catalytic additives of nitric acid. *Russian Metallurgy (Metally)*, 2009, no. 7, pp. 588–595.
38. Moreno-Castilla C., Ferro-García M.A., Joly J.P., Bautista-Toledo I., Carrasco-Marín F., Rivera-Utrilla J. Activated carbon surface modifications by nitric acid, hydrogen peroxide, and ammonium peroxydiate treatments. *Langmuir*, 1995, no. 11, pp. 4386–4392.
39. Díaz X., Snihvrowych M. *MAC's with nitric acid pretreatment*. *Internal report*. Utah, University of Utah, 2004. 7 p.


*Received 27 June 2021.*


**Information about the authors**

***Daniil V. Gordeev***, postgraduate student, Saint-Petersburg Mining University.

***Georgiy V. Petrov***, Dr. Sc., professor, Saint-Petersburg Mining University.

***Arthur V. Khasanov***, postgraduate student, Saint-Petersburg Mining University.

***Olga V. Severinova***, master student, Saint-Petersburg Mining University.

**Компьютерная верстка** *О.Ю. Аршинова*
**Корректура и перевод на английский язык** *С.В. Жаркова*
**Дизайн обложки** *Т.В. Буланова*

Фотографии на обложке взяты из личного архива
*Валерия Касаткина*

Руководство для авторов и образец оформления статьи: **izvestiya.tpu.ru**

Подписано к печати 30.01.2022. Формат 60x84/8. Бумага «Снегурочка».
Печать XEROX. Усл. печ. л. 26,17. Уч.-изд. л. 23,67.
Заказ 08-22. Тираж 500 экз.

Издательство
ТОМСКИЙ ПОЛИТЕХНИЧЕСКИЙ УНИВЕРСИТЕТ