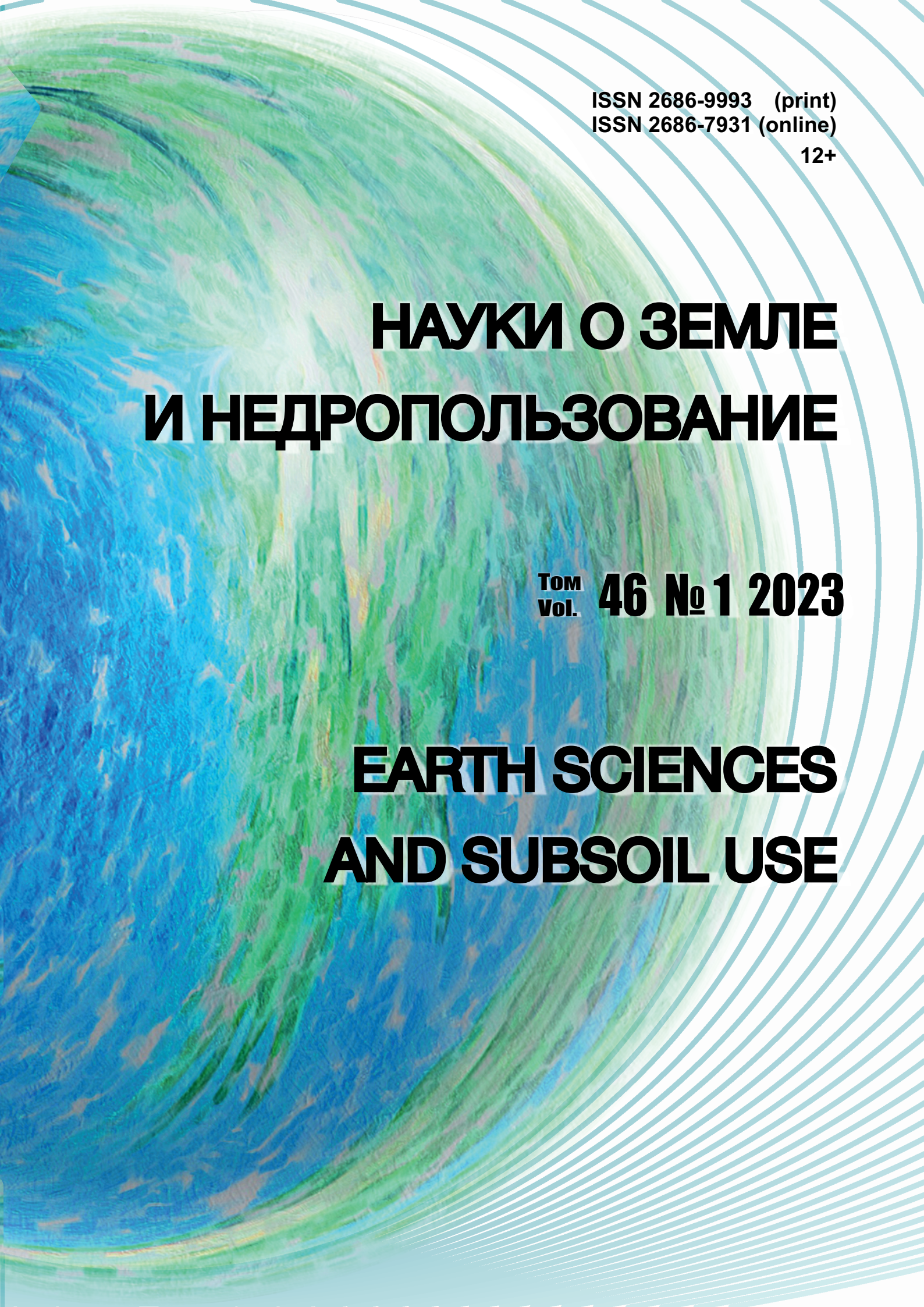




ISSN 2686-9993 (print)
ISSN 2686-7931 (online)
12+

НАУКИ О ЗЕМЛЕ И НЕДРОПОЛЬЗОВАНИЕ

Tom 46 № 1 2023
Vol.

EARTH SCIENCES AND SUBSOIL USE

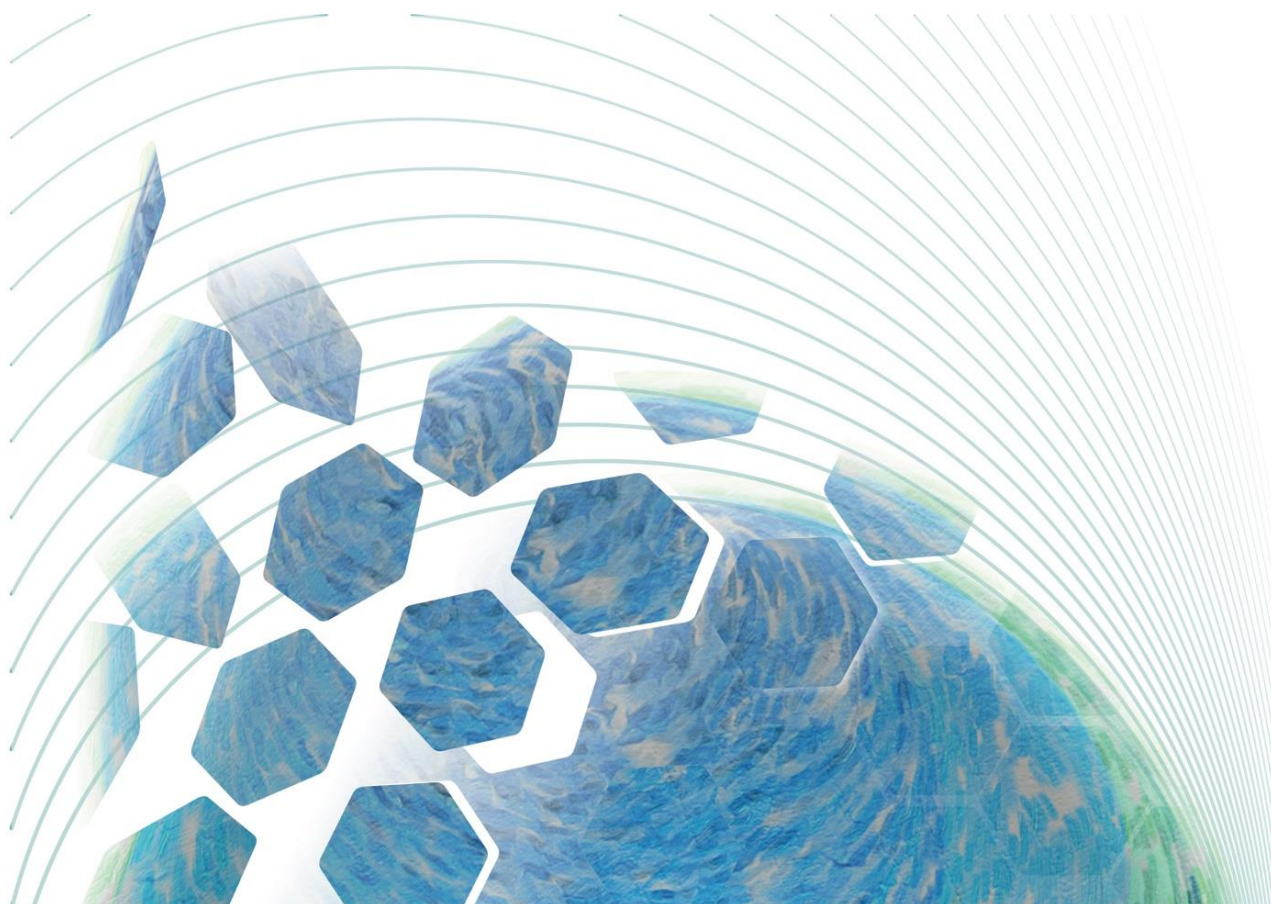
ISSN 2686-9993 (print)
ISSN 2686-7931 (online)

НАУКИ О ЗЕМЛЕ И НЕДРОПОЛЬЗОВАНИЕ

Том Vol. 46 № 1 2023

EARTH SCIENCES AND SUBSOIL USE

NAUKI O ZEMLE
I NEDROPOL'ZOVANIE



Редакционный совет

Кузьмин М.И., академик РАН, Институт геохимии СО РАН (г. Иркутск, Россия)

Гладкочуб Д.П., член-корр. РАН, Институт земной коры СО РАН (г. Иркутск, Россия)

Скляр Е.В., член-корр. РАН, Институт земной коры СО РАН (г. Иркутск, Россия)

Гордиенко И.В., член-корр. РАН, Геологический институт СО РАН (г. Улан-Удэ, Россия)

Корняков М.В., д-р техн. наук, доцент, ректор, Иркутский национальный исследовательский технический университет (г. Иркутск, Россия)

Корольков А.Т., д-р геол.-минерал. наук, проф., Иркутский государственный университет (г. Иркутск, Россия)

Макаров В.А., д-р геол.-минерал. наук, проф., Сибирский федеральный университет (г. Красноярск, Россия)

Очир Гэрэл, д-р геол.-минерал. наук, проф., Монгольский университет науки и технологии (г. Улан-Батор, Монголия)

Тальгамер Б.Л., д-р техн. наук, проф., Иркутский национальный исследовательский технический университет (г. Иркутск, Россия)

Ши Гуаньхай, проф., Геммологический институт Китайского геологического университета (г. Пекин, Китай)

Чжао Цзюньмэн, проф., Институт изучения Тибетского плато Китайской академии наук (г. Пекин, Китай)

Чжан Юнчжань, проф., Нанкинский университет (г. Нанкин, Китай)

Шигин А.О., д-р техн. наук, доцент, Сибирский федеральный университет (г. Красноярск, Россия)

Семинский К.Ж., д-р геол.-минерал. наук, Институт земной коры СО РАН (г. Иркутск, Россия)

Тимофеева С.С., д-р техн. наук, проф., Иркутский национальный исследовательский технический университет (г. Иркутск, Россия)

Зелинская Е.В., д-р техн. наук, проф., Иркутский национальный исследовательский технический университет (г. Иркутск, Россия)

Морин А.С., д-р техн. наук, проф., Сибирский федеральный университет (г. Красноярск, Россия)

Председатель редакционного совета:

Семинский Ж.В., д-р геол.-минерал. наук, проф., Иркутский национальный исследовательский технический университет (г. Иркутск, Россия)

Редакционная коллегия

Главный редактор:

Лобацкая Р.М., д-р геол.-минерал. наук, проф., зав. кафедрой ювелирного дизайна и технологий, Иркутский национальный исследовательский технический университет (г. Иркутск, Россия)

Заместитель главного редактора:

Аузина Л.И., канд. геол.-минерал. наук, доцент, Иркутский национальный исследовательский технический университет (г. Иркутск, Россия)

Ответственный секретарь:

Долгих М.Н., Иркутский национальный исследовательский технический университет (г. Иркутск, Россия)

Журнал «Науки о Земле и недропользование» **входит в действующий Перечень изданий ВАК для публикации основных результатов диссертаций на соискание ученой степени кандидата наук, на соискание ученой степени доктора наук**, включен в Научную электронную библиотеку (eLIBRARY.RU) для создания российского индекса научного цитирования, рассылается в Российскую книжную палату, ВИННИТИ РАН. Журнал включен в научную электронную библиотеку CyberLeninka, в базы данных открытого доступа DOAJ, OAJI, в международный каталог периодических изданий Ulrich's Periodicals Directory, в базу данных EBSCO. Журнал распространяется по подписке в ООО «Урал-Пресс», подписной индекс в ООО «Урал-Пресс» – 41538 (адрес ООО «Урал-Пресс»: 620026, Свердловская область, г. Екатеринбург, ул. Мамина-Сибиряка, 130, Россия). Статьи, опубликованные в журнале, реферируются и рецензируются. В журнал принимаются статьи по научному направлению «Науки о Земле».

Журнал создан в 2004 г. на основе межвузовского сборника «Геология, поиски и разведка месторождений рудных полезных ископаемых», который издавался с 1973 г. В 2004–2017 гг. журнал выходил под названием «Известия Сибирского отделения секции наук о Земле Российской академии естественных наук. Геология, поиски и разведка рудных месторождений», в 2017–2019 гг. – «Известия Сибирского отделения секции наук о Земле Российской академии естественных наук. Геология, поиски и разведка месторождений полезных ископаемых». В 2019 г. журнал переименован в «Науки о Земле и недропользование».

Периодичность выхода – 4 раза в год

Учредитель:

ФГБОУ ВО «Иркутский национальный исследовательский технический университет»

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

Регистрационный номер:
ПН № ФС77-76110 от 24.06.2019 г.

Адрес редакции, учредителя и издателя:
ФГБОУ ВО «Иркутский национальный
исследовательский технический университет»,
664074, Россия, г. Иркутск, ул. Лермонтова, 83

© ФГБОУ ВО «Иркутский национальный
исследовательский технический
университет», 2023

Editorial Council

Kuzmin M.I., Academician of the Russian Academy of Sciences, Institute of Geochemistry, SB RAS (Irkutsk, Russia)

Gladkochub D.P., Corresponding member of the Russian Academy of Sciences, Institute of the Earth's Crust, SB RAS (Irkutsk, Russia)

Sklyarov E.V., Corresponding member of the Russian Academy of Sciences, Institute of the Earth's Crust, SB RAS (Irkutsk, Russia)

Gordienko I.V., Corresponding member of the Russian Academy of Sciences, Geological Institute, SB RAS (Ulan-Ude, Russia)

Kornyakov M.V., Dr. Sci. (Eng.), Rector, Irkutsk National Research Technical University (Irkutsk, Russia)

Korolkov A.T., Dr. Sci. (Geol. & Mineral.), Professor, Irkutsk State University (Irkutsk, Russia)

Makarov V.A., Dr. Sci. (Geol. & Mineral.), Professor, Siberian Federal University (Krasnoyarsk, Russia)

Ochir Gerel, Dr. Sci. (Geol. & Mineral.), Professor, Mongolian University of Science and Technology (Ulan Bator, Mongolia)

Talgamer B.L., Dr. Sci. (Eng.), Professor, Irkutsk National Research Technical University (Irkutsk, Russia)

Shi Guanghai, Professor, School of Gemmology, Institute of China University of Geosciences (Beijing, China)

Zhao Junmeng, Professor, Institute of Tibetan Plateau Research, Chinese Academy of Sciences (Beijing, China)

Zhang Yongzhan, Professor, Nanjing University (Nanjing, China)

Shigin A.O., Dr. Sci. (Eng.), Associate Professor, Siberian Federal University (Krasnoyarsk, Russia)

Seminsky K.Zh., Dr. Sci. (Geol. & Mineral.), Institute of the Earth's Crust, SB RAS (Irkutsk, Russia)

Timofeeva S.S., Dr. Sci. (Eng.), Professor, Irkutsk National Research Technical University (Irkutsk, Russia)

Zelinskaya E.V., Dr. Sci. (Eng.), Professor, Irkutsk National Research Technical University (Irkutsk, Russia)

Morin A.S., Dr. Sci. (Eng.), Professor, Siberian Federal University (Krasnoyarsk, Russia)

Chairman of the Editorial Council

Seminsky Zh.V., Dr. Sci. (Geol. & Mineral.), Professor, Irkutsk National Research Technical University (Irkutsk, Russia)

Editorial Board

Editor-in-Chief

Lobatskaya R.M., Dr. Sci. (Geol. & Mineral.), Professor, Head of the Jewelry Design & Technology Department, Irkutsk National Research Technical University (Irkutsk, Russia)

Deputy Editor-in-Chief

Auzina L.I., Cand. Sci. (Geol. & Mineral.), Associate Professor, Irkutsk National Research Technical University (Irkutsk, Russia)

Executive secretary

Dolgikh M.N., Irkutsk National Research Technical University (Irkutsk, Russia)

The journal "Earth sciences and subsoil use" is on the current List of publications on the main results of candidate's and doctoral theses, the State Commission for Academic Degrees and Titles of the Russian Federation. It is included in the Scientific Electronic Library (eLIBRARY.RU) in order to create the Russian Science Citation Index. It is circulated to the Russian Book Chamber and the All-Russian Institute for Scientific and Technical Information of the Russian Academy of Sciences. The journal is included in CyberLeninka (the scientific electronic library), DOAJ, OAJI (open-access databases), Ulrich's Periodicals Directory, and EBSCO database. It is distributed through the Ural-Press LLC, the subscription code in Ural-Press LLC: 41538 (the postal address of Ural-Press LLC: 130 Mamin-Sibiryak St., Yekaterinburg 620026, Russia). The articles published in the journal are abstracted and peer-reviewed. The journal accepts articles related to the "Earth sciences" direction.

The journal was founded in 2004 on the basis of the Interuniversity collected papers "Geology, prospecting and exploration of ore mineral deposits" that had been published since 1973. In 2004–2017, the journal was published under the title "Proceedings of the Siberian Department of the Section of Earth Sciences of the Russian Academy of Natural Sciences. Geology, Prospecting and Exploration of Ore Deposits", and in 2017–2019, "Proceedings of the Siberian Department of the Section of Earth Sciences of the Russian Academy of Natural Sciences. Geology, Exploration and Development of Mineral Deposits". Since 2019, the title of the journal is "Earth sciences and subsoil use".

Periodicity: 4 times a year

Founder:

Federal State Budget Educational Institution of Higher Education 'Irkutsk National Research Technical University'

The journal is registered by the Federal Service for Supervision of Communications, Information Technology, and Mass Media (Roskomnadzor)

Registration No.:

PI no. FS77-76110 of June 24, 2019

Editorial Office Address: Federal State Budget Educational Institution of Higher Education "Irkutsk National Research Technical University", 83 Lermontov St., Irkutsk, 664074, Russia

© Federal State Budget Educational Institution of Higher Education "Irkutsk National Research Technical University", 2023



СОДЕРЖАНИЕ

Содержание	4
Геофизика	
Ненюкова А.И., Спичак В.В. Поиск перспективных участков для разведки геотермальных ресурсов на основе комплексного анализа разрезов петро- и теплофизических свойств пород.....	6
Янников А.М., Стручкова А.С., Корепанов А.Ю. Моделирование гидродинамического режима техногенного водоносного горизонта в пределах участка «Ноябрьский» рудника «Айхал».....	20
Геология, поиски и разведка твердых полезных ископаемых, минерагения	
Никанюк Т.С. Состав руд и характеристика самородного золота одного из рудопроявлений Восточного Забайкалья.....	36
Яковлева А.А., Гусева Е.А., Константинова М.В. Исследование свойств песков Прибайкалья.....	51
Горнопромышленная и нефтегазопромысловая геология, геофизика, маркшейдерское дело и геометрия недр	
Исмагилова В.С., Чекушина Т.В. Транспортировка трубопроводного и сжиженного природного газа: сравнительный анализ достоинств и недостатков.....	61
Макаров А.П., Храмовских В.А., Непомнящих К.А. Пути снижения остаточных сварочных напряжений в металлоконструкциях карьерных экскаваторов.....	72
Технология и техника геолого-разведочных работ	
Богданов А.В., Шкрабо А.И., Шатрова А.С. Технологические решения рекультивации промплощадки бывшего аккумуляторного завода «Востсибэлемент».....	84
Гипотезы, сообщения, дискуссии	
Лабушев М.М., Лабушев Т.М., Хохлов А.Н. Химические элементы, минералы и горные породы в единой объемной модели.....	97
К юбилейным датам	
Мовшович Я.В., Кулешов А.В., Бурдонов А.Е., Новиков Ю.В. Опыт работы Иркутского завода тяжелого машиностроения на рынке горно-обогатительного оборудования.....	125
К сведению авторов	137



CONTENTS

Contents.....	5
Geophysics	
Nenyukova A.I., Spichak V.V. Search for promising locations to explore geothermal resources based on joint analysis of sections of petro- and thermophysical properties of rocks.....	6
Yannikov A.M., Struchkova A.S., Korepanov A.Yu. Modeling hydrodynamic regime of the technogenic aquifer within the Noyabrsky site of the Aikhal mine.....	20
Geology, prospecting and exploration of solid minerals, minerageny	
Nikanyuk T.S. Ore composition and native gold characteristics of an ore occurrence in Eastern Transbaikalia.....	36
Yakovleva A.A., Guseva E.A., Konstantinova M.V. Studying Baikal region sand properties.....	51
Applied mining and petroleum field geology, geophysics, mine surveying and subsoil geometry	
Ismagilova V.S., Chekushina T.V. Transportation of pipeline and liquefied natural gas: comparative analysis of pros and cons.....	61
Makarov A.P., Khramovskikh V.A., Nepomnyashchikh K.A. Methods to reduce residual welding stresses in mining excavator metal structures.....	72
Technology and equipment of geological exploration	
Bogdanov A.V., Shkrabo A.I., Shatrova A.S. Process engineering solutions for reclamation of former Vostsibelemt battery plant industrial site.....	84
Hypotheses, reports, discussions	
Labushev M.M., Labushev T.M., Khokhlov A.N. Chemical elements, minerals and rocks in a single three-dimensional model.....	97
Anniversaries	
Movshovich Ya.V., Kuleshov A.V., Burdonov A.E., Novikov Yu.V. Irkutsk heavy engineering plant experience in the market of mining and processing equipment.....	125
Information for the Authors.....	137



ГЕОФИЗИКА

Научная статья

УДК 550.83

<https://doi.org/10.21285/2686-9993-2023-46-1-6-19>

Поиск перспективных участков для разведки геотермальных ресурсов на основе комплексного анализа разрезов петро- и теплофизических свойств пород

А.И. Ненюкова^a, В.В. Спичак^b^aРоссийский государственный геологоразведочный университет им. Серго Орджоникидзе, г. Москва, Россия^bЦентр геоэлектromагнитных исследований – филиал Института физики Земли им. О.Ю. Шмидта РАН, г. Троицк, г. Москва, Россия

Резюме. Целью работы являлось выделение перспективных участков для разведки геотермальных ресурсов по результатам комплексного анализа разрезов петро- и теплофизических свойств пород. По результатам магнито-теллурических зондирований, проведенных в рассматриваемой геотермальной зоне ранее, и построенных двумерных моделей удельного сопротивления, пористости, проницаемости, температуры, теплопроводности и удельной теплоемкости выполнен комплексный кластерный анализ разрезов всех перечисленных параметров. По всем рассматриваемым параметрам построен кластерный разрез, который по существу является петро- теплофизическим «паспортом» изучаемого участка недр, каждый пространственный кластер которого характеризуется своим набором диапазонов значений рассматриваемых свойств. В геотермальной области Сульц-су-Форе (Франция) выделены два участка, перспективные для бурения разведочных скважин. Один из них соответствует найденному ранее и уже разрабатываемому резервуару петротермальной энергии. Второй расположен на глубинах 2–3 км в другой части разреза и может представлять интерес для проведения новых разведочных работ. Созданная таким образом информационная база является удобным инструментарием для интерактивного отбора участков, перспективных с точки зрения поиска тех или иных ресурсов, и построения так называемой «карты перспективности» участков поверхности для бурения разведочных скважин.

Ключевые слова: геотермальная зона, разведочное бурение, кластерный анализ, температура, пористость, проницаемость, теплопроводность, удельная теплоемкость, карта перспективности

Финансирование: Работа выполнена при поддержке Российского научного фонда (грант № 20-17-00155).

Для цитирования: Ненюкова А.И., Спичак В.В. Поиск перспективных участков для разведки геотермальных ресурсов на основе комплексного анализа разрезов петро- и теплофизических свойств пород // Науки о Земле и недропользование. 2023. Т. 46. № 1. С. 6–19. <https://doi.org/10.21285/2686-9993-2023-46-1-6-19>.

GEOPHYSICS

Original article

Search for promising locations to explore geothermal resources based on joint analysis of sections of petro- and thermophysical properties of rocks

Alena I. Nenyukova^a, Vyacheslav V. Spichak^b^aSergo Ordzhonikidze Russian State University for Geological Prospecting, Moscow, Russia^bCenter for Geoelectromagnetic Research – branch of the Schmidt Institute of Physics of the Earth RAS, Troitsk, Moscow, Russia

Abstract. The purpose of the study is identification of locations promising for geothermal resource exploration based on the joint analysis of sections of petro- and thermophysical properties of rocks. Having conducted magnetotelluric sounding in the geothermal area under investigation and having built 2-D models of electrical resistivity, porosity, permeability, temperature, thermal conductivity and specific heat capacity, the authors performed a joint cluster analysis of sections of



enumerated parameters. A cluster cross-section is constructed taking into account all the discussed parameters, which is essentially a petro- and thermophysical “passport” of the site under examination. Each cluster of the latter is characterized by its own set of property ranges. Two promising locations for drilling exploratory boreholes have been identified in the Soultz-sous-Forêts (France) geothermal area. One of them corresponds to the already developed reservoir of petrothermal energy, while another is located at the depths of 2–3 km in another part of the section and has a potential for future exploration works. The information base created on this basis is a convenient tool for interactive selection of sites promising for exploration of different deposits and building of a “prospectivity map” of surface sites for drilling exploration boreholes.

Keywords: geothermal zone, exploration drilling, cluster analysis, temperature, porosity, permeability, thermal conductivity, specific heat capacity, prospectivity map

Funding: The study was funded by the Russian Science Foundation (grant no. 20-17-00155).

For citation: Nenyukova A.I., Spichak V.V. Search for promising locations to explore geothermal resources based on joint analysis of sections of petro- and thermophysical properties of rocks. *Nauki o Zemle i nedropol'zovanie = Earth sciences and subsoil use*. 2023;46(1):6-19. (In Russ.). <https://doi.org/10.21285/2686-9993-2023-46-1-6-19>.

Введение

Источниками геотермальной энергии чаще всего служат природные горячие воды или пар, которые могут применяться для непосредственного обогрева зданий либо для получения электрической энергии. Геотермальные ресурсы разделяют на гидротермальные, предполагающие использование подвижных теплоносителей – природного пара, термальных вод и пароводных смесей [1], а также петротермальные, использующие энергию горячих твердых пород и их расплавов, которая может быть извлечена в их теплообмене с техногенным подвижным теплоносителем [2–4]. Поскольку в первом случае носителем тепла являются флюиды, то для поиска их источников и каналов транспортировки к поверхности используют методы электромагнитного (чаще всего магнитотеллурического) зондирования, наиболее чувствительные к типу и объему флюидов [5–13]. В то же время применение петротермальной энергетики основывается на том тепле, которое можно получать не только из подземных вод, но и из сухих твердых пород (так называемые «инженерные» системы, или HDR (*англ.*: Hot Dry Rocks)).

В обоих случаях для повышения эффективности поиска геотермальных ресурсов используют стратегии, учитывающие геологию местности, уровень теплового потока на поверхности и другие факторы¹. Важным элементом такой стратегии является построение предварительной концептуальной модели участка, основанной на качественном анализе всей имеющейся геолого-геофизической информации [14–16]. Тем не менее для поиска

геотермальных ресурсов на глубинах, превышающих глубины пробуренных скважин (в большей степени это касается петротермальных месторождений), необходимым условием является построение глубинных моделей петро- и теплофизических свойств недр и их последующий комплексный анализ.

На сегодняшний день известно много методов комплексного количественного анализа геофизической информации [17, 18]. Среди них можно выделить методы распознавания образов (в частности кластерный анализ), позволяющие находить области в пространстве рассматриваемых параметров со схожими свойствами, а затем квалифицировать их как потенциальные индикаторы тех или иных явлений / процессов или как кластеры петрофизических свойств среды, характеризующие ту или иную литологию [19–24].

Цель настоящей работы состоит в том, чтобы на основе современных достижений в развитии методов кластерного анализа оценить возможность его применения для поиска целей разведочного бурения геотермальных скважин. Для этого мы использовали результаты магнитотеллурических зондирований в геотермальной зоне Сульц-су-Форе (Франция), а также модели других петро- и теплофизических свойств, построенные вдоль того же профиля в последнее время [25–27].

Материалы и методы исследования

Геотермальная область Сульц-су-Форе расположена в пределах Верхне-Рейнского грабена (рис. 1), который является частью

¹ Best practices guide for geothermal exploration. Bochum: IGA Service GmbH, 2014. 194 p.



европейской кайнозойской рифтовой системы, простирающейся от Средиземноморского побережья до предгорья Альп. Наблюдаемый в этой области рельеф границы Мохо представляет собой куполообразную структуру под Рейнским грабеном. Геотермальные скважины расположены внутри Верхне-Рейнского грабена и локально проникают в так называемый Сульцевский горст (см. вставку на рис. 1), составленный из осадков кайнозойской и мезозойской формаций (от триаса до средней юры), лежащих на палеозойском кристаллическом фундаменте.

В ходе геотермального проекта в регионе Сульц-су-Форе, начавшегося в 1986 г., было пробурено пять глубоких скважин. На рис. 1 (вставка) показаны скважины GPK2, GPK3 и GPK4, используемые в настоящее время для эксплуатации высокоэнталийного резервуара, обнаруженного в низах осадочного чехла.

По результатам магнитотеллурических зондирований, проведенных в рассматриваемой геотермальной зоне ранее вдоль профиля АВ (см. вставку на рис. 1), и измерений в скважинах в работах [7–12] были построены двумерные модели удельного сопротивления, пористости, проницаемости, температуры, теплопроводности и удельной теплоемкости (рис. 2).

Для выделения петро-теплофизических индикаторов геотермального резервуара был проведен кластерный анализ как всех перечисленных параметров, так и отдельных групп, составленных из их числа. Основными элементами комплексного кластерного анализа являлись: метод главных компонент (*англ.*: PCA, Principal Component Analysis), метод самоорганизующихся карт (*англ.*: SOM, Self-Organizing Map) и кластеризация методом К-средних. На рис. 3 показана общая блок-схема процесса, который описывается ниже.

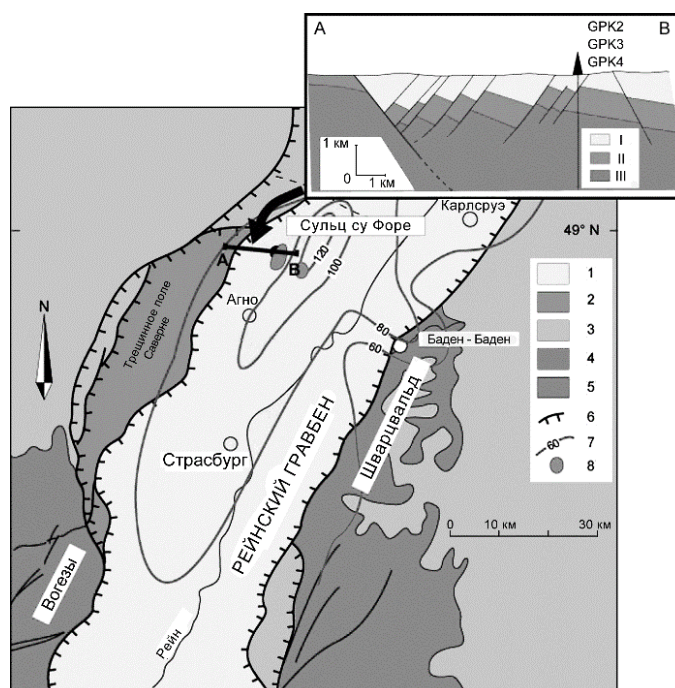


Рис. 1. Геотермальная область Сульц-су-Форе (Франция) и геология Верхне-Рейнского грабена [25]:

1 – кайнозойские осадки; 2 – кайнозойские вулканогенные породы; 3 – юрские отложения;
4 – триасовые отложения; 5 – герцинский фундамент; 6 – граничные разломы;
7 – изолинии температуры, °С, на глубине 1500 м; 8 – локальные термальные аномалии

На вставке приведен упрощенный геологический разрез области

(АВ – профиль магнитотеллурических зондирований):

I – кайнозойские заполняющие осадки; II – мезозойские осадки; III – гранитное основание

Fig. 1. Geothermal area of Soutz-sous-Forêts (France) and geology of the Upper Rhine graben [25]:

1 – Cenozoic sediments; 2 – Cenozoic volcanic rocks; 3 – Jurassic deposits; 4 – Triassic deposits; 5 – Hercynian basement; 6 – boundary faults; 7 – temperature isolines, °C at 1500 m depth; 8 – local thermal anomalies

The insert box demonstrates a schematic geological section of the region (AB is a profile of magnetotelluric sounding):

I – Cenozoic filling sediments; II – Mesozoic sediments; III – granite basement

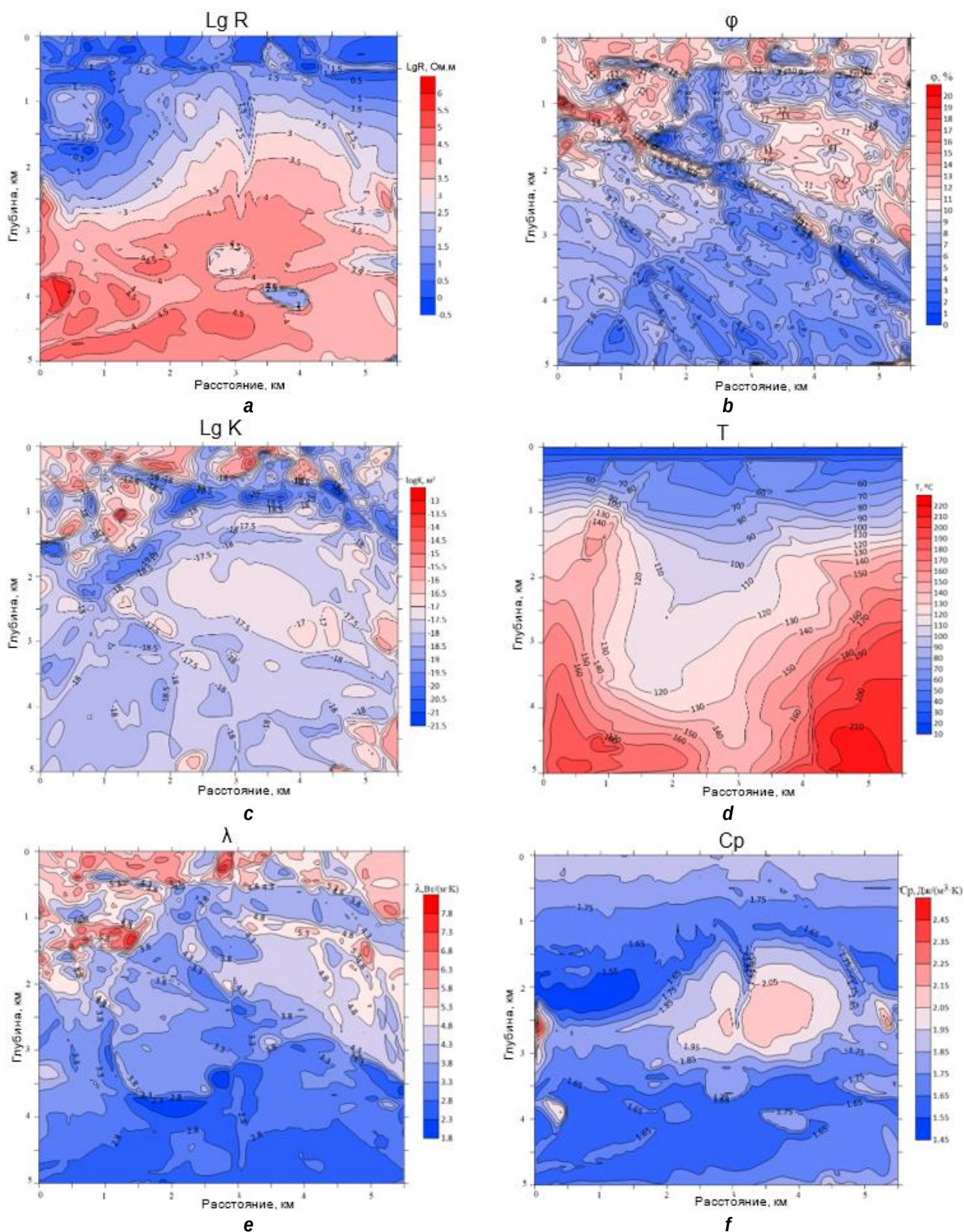


Рис. 2. Разрезы логарифма удельного сопротивления (а), пористости (b), логарифма проницаемости (с), температуры (d), теплопроводности (е) и удельной теплоемкости (f)
Fig. 2. Sections of specific resistivity logarithm (a), porosity (b), permeability logarithm (c), temperature (d), thermal conductivity (e) and specific heat capacity (f)

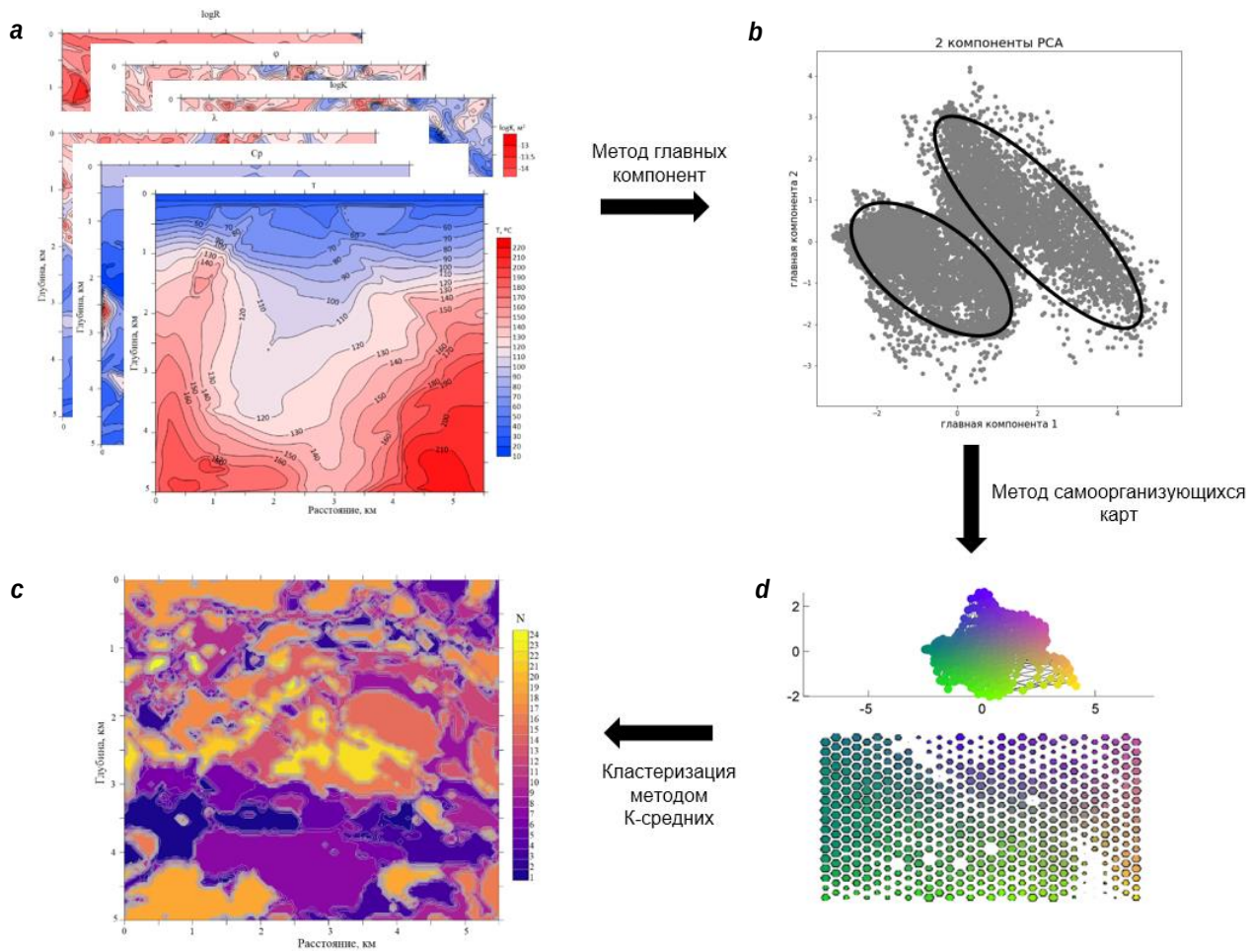


Рис. 3. Общая блок-схема обработки информации:

a – разрезы петро- и теплофизических параметров; b – результат выделения главных компонент; c – результат кластеризации; d – кластерный разрез в пространстве географических координат

Fig. 3. General block flow diagram of data processing:

a – sections of petro- and thermophysical parameters; *b* – result of principal components selection; *c* – clustering result; *d* – cluster section in the geographical coordinate space

Метод главных компонент. В первую очередь при анализе данных использовался метод главных компонент – один из основных способов уменьшения размерности данных при наименьшей потере количества информации. Нахождение главных компонент сводилось к вычислению собственных векторов и собственных значений ковариационной матрицы исходных данных. В этом случае данные преобразовывались в два вектора, с которыми производились дальнейшие операции для определения геометрии и размера будущей карты SOM. Отношение длины и ширины карты приблизительно соответствует отношению длин двух собственных векторов.

Метод самоорганизующихся карт. Далее был применен метод самоорганизующихся карт – неконтролируемый метод машинного обучения, используемый для получения низко-

размерного представления набора данных более высокой размерности с сохранением топологической структуры данных. Идея метода сводилась к введению априорной информации об оптимальном числе кластеров и обучению искусственной нейросети Кохонена выделению в исследуемом пространстве земных недр пространственных участков с однотипными характеристиками.

Искусственная нейронная сеть Кохонена (SOM) представляла собой двуслойную сеть: каждый нейрон первого (входного) слоя был соединен со всеми нейронами второго (выходного) слоя, которые расположены в виде двумерной решетки (карты). Нейроны входного слоя соответствуют физическим свойствам пород, нейроны выходного слоя – кластерным элементам, количество которых задается извне и определяет максимальное



количество групп – кластеров, на которые система может разделить входные данные. В процессе обучения на вход такой нейросети последовательно подавались обучающие примеры, которые представляли собой значения физических свойств пород в одних и тех же узлах координатной сетки.

Таким образом, с помощью самоорганизующихся карт Кохонена происходило преобразование многомерного пространства физических свойств в карту SOM, в которой фиксировано положение каждого компонента в системе осей двух собственных векторов. С помощью цветового кодирования компонент выделялись участки с однотипными характеристиками.

Кластеризация методом K-средних. Для создания кластерного разреза использовался метод K-средних – итерационный метод поиска набора центроидов, наилучшим образом представляющий распределение обучающих наблюдений. Метод относит каждое обучающее наблюдение к одному из K-кластеров таким образом, чтобы каждый кластер был представлен центроидом соответствующих наблюдений, а каждое наблюдение отстояло бы от центроида своего кластера меньше, чем от центроидов других кластеров. Кластеризация происходила на данных метода самоорганизующихся карт, полученных на предыдущем шаге, что значительно уменьшило разброс рассматриваемых параметров.

Результаты исследования и их обсуждение

Обработка информации в соответствии со схемой, показанной на рис. 3, осуществлялась с использованием пакета программ KK Analysis, в котором перечисленные выше методы и процедуры реализованы и тестированы на многочисленных наборах геофизических данных [24].

Критерий останова итерационного процесса. Для того чтобы избежать традиционно субъективного задания числа кластеров, в работе применялся подход, основанный на априорной оценке оптимальной степени кластеризации с помощью специального индекса Дэвиса – Боулдина DBI [28]. Он вычислялся в ходе итерационного процесса кластеризации как отношение суммарной «внутренней» дис-

персии (сумма расстояний между членами каждого кластера от центроида) к «внешней» дисперсии (расстояние между центроидами кластеров):

$$DBI = 1/K \sum_k D_k = 1/K \sum_k \max \left(\frac{s_i + s_j}{\|c_i - c_j\|} \right),$$

где K – общее количество кластеров; s_i и s_j – показатели дисперсии в каждом кластере; c_i и c_j – соответствующие векторы центроидов кластеров.

Оценка влияния предварительного выделения главных компонент на скорость процесса кластеризации. С целью оценки влияния предварительного выделения главных компонент на скорость сходимости процесса кластеризации исследования проводились в двух вариантах: с использованием метода главных компонент и без него. При этом количество главных компонент задавалось извне и в ходе экспериментов изменялось от 2 до 5. На рис. 4 показаны графики зависимости значений индекса DBI от количества кластеров с использованием метода главных компонент для предварительного выделения главных компонент и без него. В целом при использовании анализа главных компонент индекс DBI имел меньшее значение, чем без его использования. При этом оптимальным (с точки зрения скорости сходимости процесса кластеризации) было выделение двух главных компонент, а минимальное значение индекса DBI (равное 0,7) достигалось при количестве кластеров, равном 24.

Оценка влияния числа априорно задаваемых кластеров на результаты кластеризации. Для оценки «качества» кластеризации в зависимости от числа кластеров проводилось специальное исследование динамики кластерного разреза при использовании метода главных компонент с выделением двух главных компонент, в котором число используемых кластеров N искусственно задавалось априори ($N = 5, 10, 15, 20, 24$), а не оценивалось в зависимости от скорости сходимости, как выше. Как и следовало ожидать, с ростом числа кластеров разрешение структуры растет и при $N = 24$ достигает своего наибольшего значения (рис. 5). При меньшем количестве априорно задаваемых кластеров разрешение структуры было бы недостаточным, а при большем приводило бы к неоправданным затратам времени.

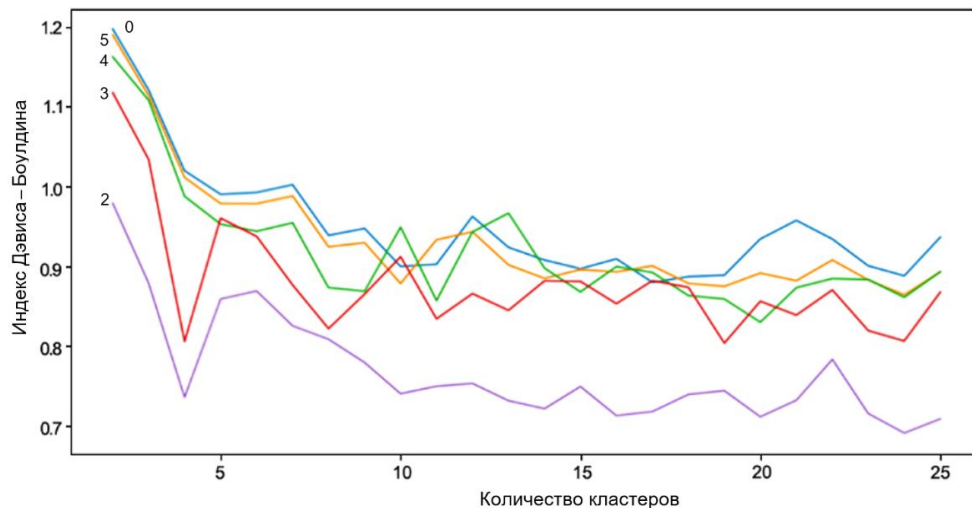


Рис. 4. График зависимости значений индекса Дэвиса – Боулдина от количества кластеров без использования метода главных компонент и при его использовании с выделением разного количества главных компонент

Индексы на графиках указывают количество выделенных главных компонент

Fig. 4. Davis – Bouldin index values vs number of clusters independently of the principal component method and using it with the selection of a different number of principal components

Indexes on the graphs indicate the number of distinguished principal components

Построенный кластерный разрез (см. рис. 5, е) и соответствующие диапазоны значений всех рассмотренных параметров (табл. 1) по существу являются «паспортом» изучаемого участка недр, каждый кластер которого характеризуется своим набором диапазонов значений параметров. Такая широкая информационная база, в которую могут быть добавлены, например, разрезы пористости и модулей упругости, удобна для последующего интерактивного выбора участка земных недр, перспективного с точки зрения оптимизации заданной функции цели. При этом в каждом конкретном случае выбор параметров, по которым решается задача кластеризации, определяется извне в зависимости от имеющихся данных и поставленных целей.

Поиск участков, перспективных для разработки петротермальных ресурсов. В качестве примера рассмотрим задачу выбора участков земных недр, перспективных с точки зрения проведения поисковых геолого-геофизических работ по выбору места для разведочного бурения геотермальной скважины. В контексте поиска петротермальных ресурсов такими целевыми параметрами могут быть температура T , проницаемость K и удельная теплоемкость C_p пород.

Как и в общем случае, рассмотренном выше, проводилось предварительное исследование,

направленное на оптимизацию вычислительной схемы. В частности, было определено, что достаточно проводить кластеризацию с предварительным выделением двух главных векторов, а оптимальное количество кластеров равно 15.

На рис. 6 и в табл. 2 показаны результаты кластеризации по указанным выше параметрам.

Для поиска участка, перспективного для бурения разведочной скважины, мы решали многокритериальную задачу оптимизации с достаточно мягкими ограничениями по температуре ($T_{cp} > 100$ °C) и минимальной проницаемости ($\text{abs}(\lg K) < 17$) на данных о средних значениях параметров в кластерах.

По результатам оптимизации было определено, что заданным ограничениям удовлетворяют кластеры 8 и 9, которые характеризуются следующими средними значениями параметров:

– кластер 8: $T = 144,7$ °C; $\lg K = -16,9$; $C_p = 1,8$ Дж/(м³·K);

– кластер 9: $T = 103,4$ °C; $\lg K = -16,8$; $C_p = 2$ Дж/(м³·K).

Первый из них расположен на глубинах 0,5–1,5 км в северо-западной части разреза и уже подтвержден бурением трех эксплуатационных скважин (GPK2, GPK3, GPK4), а второй – на глубинах 2–3 км в юго-восточной



части разреза. На рис. 6 показан соответствующий участок поверхности, с которого целе-

сообразно проводить новое разведочное бурение.

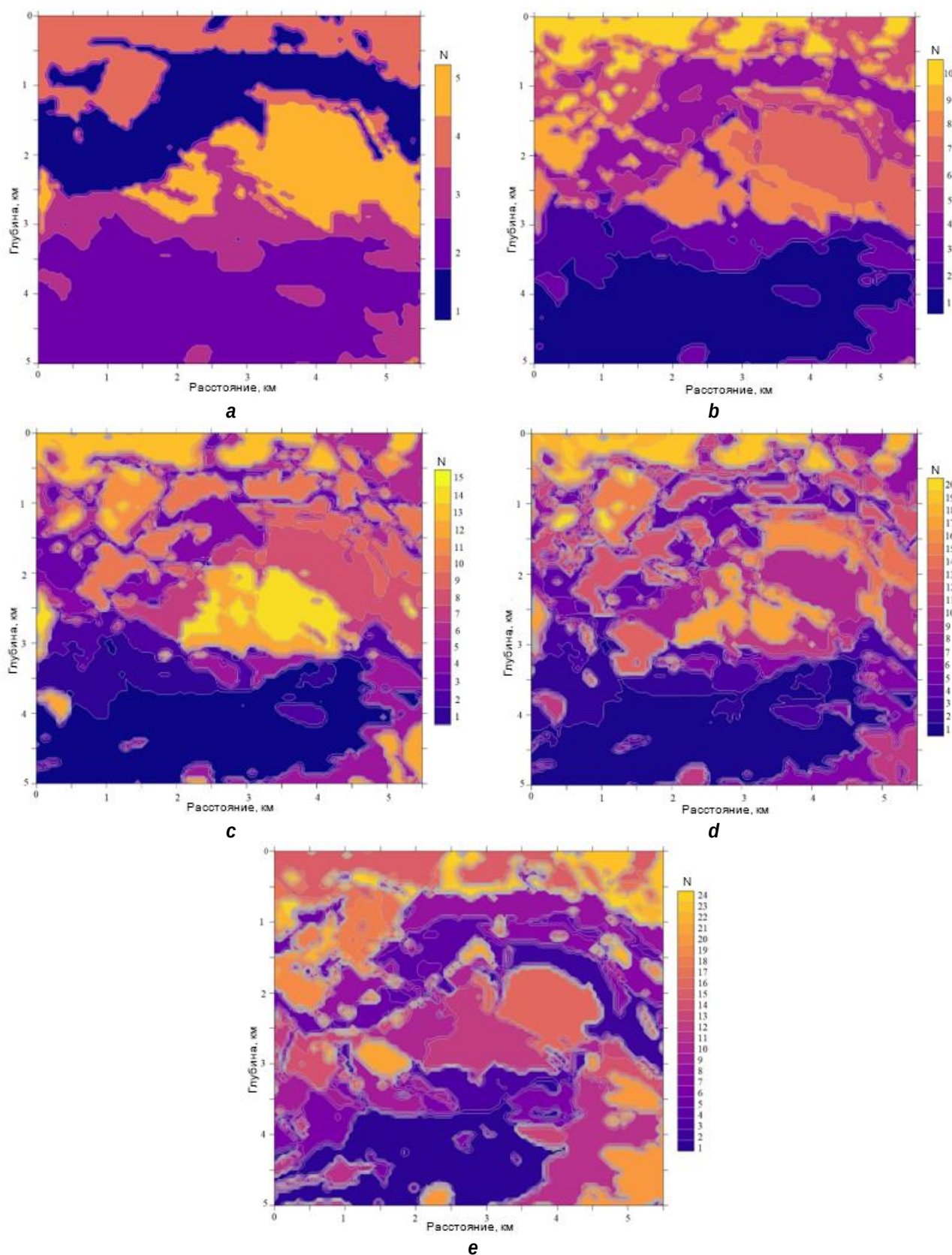


Рис. 5. Кластерные разрезы при числе кластеров, равном 5 (а), 10 (б), 15 (с), 20 (д), 24 (е)
Fig. 5. Cluster sections with the number of clusters that equals 5 (a), 10 (b), 15 (c), 20 (d), 24 (e)



Таблица 1. Диапазоны значений параметров для каждого из 24 кластеров, показанных на рис. 5
Table 1. Parameter value ranges for each of 24 clusters shown in Fig. 5

<i>N</i>	$\lg R$, Ом·м	ϕ , %	$\lg K$, м ²	<i>T</i> , °С	λ , Вт/(м·К)	C_p , Дж/(м ³ ·К)
1	3,3...5,5	2,6...9,7	-19,1...-17,4	112,7...193	2,5...4,6	1,6...1,8
2	0,1...2,6	4...14,2	-19,9...-17,4	20...154,3	3,2...5,7	1,5...1,9
3	3,2...4,5	1,6...8,4	-18,4...-17	131,7...216,6	2,2...4,3	1,6...1,8
4	0...2,6	5,4...20	-19,5...-16,8	20...148,7	4...7,9	1,6...1,9
5	2,7...5,2	2,1...10,9	-18,5...-16,8	102,2...198,2	2,1...4,8	1,7...1,9
6	1...4,7	2,7...8,9	-18,9...-17,1	87,5...207,4	2,8...4,6	1,7...1,9
7	3,4...5,5	1,8...8,2	-18,8...-16,7	116,9...186,1	1,9...3,4	1,6...1,7
8	2,5...3,7	6,9...13,2	-18,5...-16,6	67,3...188,6	3,5...5,4	1,7...2
9	1,6...5,6	2,5...12,1	-18,7...-16,4	118...218,1	2...3,7	1,6...2
10	-0,1...2,2	4,7...19,8	-18,1...-15,7	20...151,4	3,5...7,5	1,6...1,9
11	-0,3...2,5	3,4...16,4	-20,5...-16,9	20...154,8	3,3...6,8	1,5...1,9
12	0,7...2,9	7...13,6	-18,4...-16,6	66,5...181,9	3,5...6,3	1,6...1,8
13	2,2...4,2	4...11,8	-18,3...-16,7	90,9...198,6	3...4,7	1,8...2
14	0,9...2,7	3,2...9,9	-18,8...-17,3	47,3...150,9	3,2...4,8	1,5...1,8
15	1,1...4,5	6,8...14,9	-18,2...-15,5	99,1...211,3	2,6...5,3	1,8...2,2
16	1,1...6	1,9...13	-18,5...-15,3	104,9...217,6	2,3...4,7	1,7...2,1
17	0,2...2,6	0,6...12,5	-21,9...-18	20...145,9	3,2...5,4	1,5...1,9
18	-0,4...2,8	7,1...15,2	-17,5...-13,6	20...127,9	4,3...7,7	1,7...2
19	3,4...5,5	0...7,2	-18,6...-17,6	151,3...212,5	2,3...3,6	1,6...1,7
20	-0,2...2,6	4,2...10,7	-18,1...-16,2	56,5...154,8	3,2...5,5	1,5...1,8
21	1,7...3,2	4,3...11,9	-18,5...-16,7	62,7...154	3,1...4,7	1,6...1,9
22	3,3...5	3...9,4	-18,1...-16,8	103...161,7	2,7...5,2	1,9...2,5
23	2...4,1	3,5...6,7	-18,7...-17,4	78,1...146,4	3,2...4,8	1,6...1,8
24	0,3...3,2	9,3...17,4	-17,6...-14,2	88,6...197,2	4,1...7,1	1,7...1,9

Примечание. *N* – номер кластера; *R* – удельное сопротивление; ϕ – пористость; *K* – проницаемость; *T* – температура; λ – теплопроводность; C_p – удельная теплоемкость.

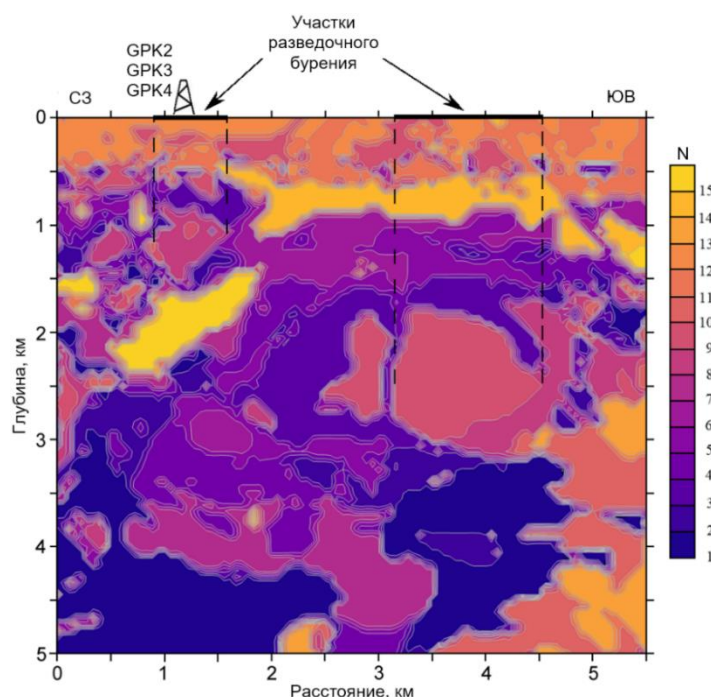


Рис. 6. Кластерный разрез, построенный по данным температуры, проницаемости и удельной теплоемкости
GPK2, GPK2 и GPK4 – эксплуатационные скважины, которые используются в настоящее время для извлечения геотермальных ресурсов

Fig. 6. Cluster section built on temperature, permeability and specific heat capacity data
GPK2, GPK2 and GPK4 are producing wells currently used for geothermal resource extraction



Таблица 2. Диапазоны значений параметров для каждого из 15 кластеров, показанных на рис. 6
Table 2. Parameter value ranges for each of 15 clusters shown in Fig. 6

<i>N</i>	$\lg K, \text{ м}^2$	$T, ^\circ\text{C}$	$C_p, \text{ Дж}/(\text{м}^3 \cdot \text{K})$
1	-19...-16,8	119,2...213,1	1,5...1,7
2	-19...-16,7	96,8...182,8	1,6...1,9
3	-18,3...-15,8	43,7...146,7	1,7...2
4	-19,1...-17,1	93,5...164,4	1,6...1,8
5	-18,6...-16,9	64,8...129,6	1,6...1,9
6	-19...-17,7	50,8...121,5	1,6...1,8
7	-19,1... (-17,6	109,9...169	1,5...1,7
8	-18,5...-14,5	76,8...207,4	1,6...2,1
9	-18,1...-13,6	20...178,8	1,7...2,5
10	-18,7...-16,6	137,4...218,1	1,6...1,9
11	-19,5...-17,3	20...89,2	1,7...1,9
12	-18...-15,7	20...63,6	1,8...2
13	-17,2...-15,3	159,2...217,6	1,6...2
14	-21,9...-18,9	20...115,1	1,6...1,9
15	-20,7...-18,6	101,4...146,7	1,5...1,7

Примечание: *N* – номер кластера; *K* – проницаемость; *T* – температура; *C_p* – удельная теплоемкость.

Закключение

Таким образом, в ходе осуществленного исследования по результатам магнитотеллурических зондирований, проведенных в рассматриваемой геотермальной зоне ранее, и построенных двумерных моделей удельного сопротивления, пористости, проницаемости, температуры, теплопроводности и удельной теплоемкости выполнен комплексный кластерный анализ разрезов всех перечисленных параметров, а также отдельных групп, составленных из их числа.

Предложена новая схема проведения кластерного анализа данных, включающая метод главных компонент, метод самоорганизующихся карт и собственно кластеризацию методом *K*-средних. Проведена оптимизация вычислительной схемы, позволившая уйти от основной проблемы кластеризации – необходимости субъективного выбора числа кластеров. Вместо этого в работе применялся подход, основанный на оценке оптимальной степени кластеризации с помощью специального индекса, который вычисляется в ходе итерационного процесса кластеризации.

По всем рассматриваемым параметрам построен кластерный разрез, который по существу является петро-теплофизическим «паспортом» изучаемого участка недр, каждый пространственный (в данном случае двумерный) кластер которого характеризуется своим набором диапазонов значений параметров. Созданная таким образом информационная база является удобным инструментарием для последующего интерактивного отбора участков земных недр, перспективных с точки зрения поиска тех или иных ресурсов, и построения так называемой «карты перспективности» участков поверхности для бурения разведочных скважин.

На основании совместного кластерного анализа построенных разрезов выделены два участка земных недр рассматриваемой геотермальной зоны, перспективные для бурения разведочных геотермальных скважин. Один из них совпадает с найденным ранее и уже разрабатываемым резервуаром петротермальной энергии. Второй расположен на глубинах 2–3 км в другой части разреза и может представлять интерес для проведения новых разведочных работ.

Список источников

1. Manzella A., Serra D., Cesari G., Bargiavchi E., Cei M., Cerutti P., et al. Geothermal energy use, country update for Italy // European Geothermal Congress 2019 (Den Haag, 11–14 June 2019). Den Haag, 2019. P. 1–19.

2. Olasolo P., Juárez M.C., Morales M.P., D'Amico S., Liarte I.A. Enhanced geothermal systems (EGS): a review // Renewable and Sustainable Energy Reviews. 2016. Vol. 56. P. 133–144. <https://doi.org/10.1016/j.rser.2015.11.031>.



3. Fridleifsson G.O., Bogason S.G., Stoklosa A.W., Ingolfsson H.P., Vergnes P., Thorbjörnsson I.Ö., et al. Deployment of deep enhanced geothermal systems for sustainable energy business // *European Geothermal Congress 2016* (Strasbourg, 19–24 September 2016). Strasbourg, 2016. P. 1–8.
4. Koelbel T., Genter A. Enhanced geothermal systems: the Soultz-sous-Forêts project // *Towards 100 % Renewable Energy* / ed. T. Uyar. Cham: Springer, 2017. P. 243–248.
5. Muñoz G. Exploring for geothermal resources with electromagnetic methods // *Surveys in Geophysics*. 2014. Vol. 35. P. 101–122. <https://doi.org/10.1007/s10712-013-9236-0>.
6. Amatyakul P., Wood S.H., Rung-arunwan T., Vachirienchai C., Prommakorn N., Chanapiwat P., et al. An assessment of a shallow geothermal reservoir of Mae Chan hot spring, northern Thailand via magnetotelluric surveys // *Geothermics*. 2021. Vol. 95. P. 102137. <https://doi.org/10.1016/j.geothermics.2021.102137>.
7. Bertrand E., Caldwell T.G., Hill G.J., Bennie S.L. 3-D inversion of a 200+ site magnetotelluric array for deep geothermal exploration // *5th International Symposium on Three-Dimensional Electromagnetics* (Sapporo, 7–9 May 2013). Sapporo, 2013. P. 1–3.
8. Heise W., Caldwell T.G., Bibby H.M., Bannister S.C. Three-dimensional modelling of magnetotelluric data from the Rotokawa geothermal field, Taupo Volcanic Zone, New Zealand // *Geophysical Journal International*. 2008. Vol. 173. Iss. 2. P. 740–750. <https://doi.org/10.1111/j.1365-246X.2008.03737.x>.
9. Maryadi M., Firdaus A., Zarkasyi A., Mizunaga H. Electrical resistivity structure of Danau Ranau geothermal prospect area based on integrated 3-D inversion of impedance tensor and tipper vector // *Geothermics*. 2022. Vol. 106. P. 102575. <https://doi.org/10.1016/j.geothermics.2022.102575>.
10. Pace F., Martí A., Queralt P., Santilano A., Manzella A., Ledo J., et al. Three-dimensional magnetotelluric characterization of the Travale geothermal field (Italy) // *Remote Sensing*. 2022. Vol. 14. Iss. 3. P. 542. <https://doi.org/10.3390/rs14030542>.
11. Peacock J.R., Mangan M.T., McPhee D., Wnnamaker P.E. Three-dimensional electrical resistivity model of the hydrothermal system in Long Valley Caldera, California from magnetotellurics // *Geophysical Research Letters*. 2016. Vol. 43. Iss. 15. P. 7953–7962. <https://doi.org/10.1002/2016GL069263>.
12. Uchida T. Three-dimensional magnetotelluric investigation in geothermal fields in Japan and Indonesia // *World Geothermal Congress 2005* (Antalya, 24–29 April 2005). Antalya, 2005. P. 1–12.
13. Wannamaker P.E., Jiracek G.R., Stodt J.A., Caldwell T.G., Gonzales V.M., McKnight J.D., et al. Fluid generation and pathways beneath an active compressional orogen, the New Zealand Southern Alps, inferred from magnetotelluric data // *Journal of Geophysical Research: Solid Earth*. 2002. Vol. 107. Iss. B6. P. 6–20. <https://doi.org/10.1029/2001JB000186>.
14. Heap M.J., Kushnir A.R., Gilg H.A., Violay M.E., Harlé P., Baud P. Petrophysical properties of the Muschelkalk from the Soultz-sous-Forêts geothermal site (France), an important lithostratigraphic unit for geothermal exploitation in the Upper Rhine Graben // *Geothermal Energy*. 2019. Vol. 7. P. 27. <https://doi.org/10.1186/s40517-019-0145-4>.
15. Gola G., Bertini G., Bonini M., Botteghi S., Brogi A., De Franco R., et al. Data integration and conceptual modelling of the Larderello geothermal area, Italy // *Energy Procedia*. 2017. Vol. 125. P. 300–309. <https://doi.org/10.1016/j.egypro.2017.08.201>.
16. Oka D., Tamura M., Mogi T., Nakagawa M., Takahashi H., Ohzono M., et al. Conceptual model of supercritical geothermal system in Shiribeshi Region, Hokkaido, Japan // *Geothermics*. 2023. Vol. 108. P. 102617. <https://doi.org/10.1016/j.geothermics.2022.102617>.
17. Спичак В.В. Современные методы комплексного анализа и инверсии геофизических данных // *Геология и геофизика*. 2020. Т. 61. № 3. С. 422–443. <https://doi.org/10.15372/GiG2019092>.
18. Integrated imaging of the Earth: Theory and applications / M. Moorkamp, P.G. Lelièvre, N. Linde, A. Khan (eds.). New Jersey: John Wiley & Sons, 2016. 253 p.
19. Bauer K., Muñoz G., Moeck I. Pattern recognition and lithological interpretation of collocated seismic and magnetotelluric models using self-organizing maps // *Geophysical Journal International*. 2012. Vol. 189. Iss. 2. P. 984–998. <https://doi.org/10.1111/j.1365-246X.2012.05402.x>.
20. Brehme M., Bauer K., Nukman M., Regenspurg S. Self-organizing maps in geothermal exploration – a new approach for understanding geochemical processes and fluid evolution // *Journal of Volcanology and Geothermal Research*. 2017. Vol. 336. P. 19–32. <https://doi.org/10.1016/j.jvolgeores.2017.01.013>.
21. Carollo A., Capizzi P., Martorana R. Joint interpretation of seismic refraction tomography and electrical resistivity tomography by cluster analysis to detect buried cavities // *Journal of Applied Geophysics*. 2020. Vol. 178. P. 104069. <https://doi.org/10.1016/j.jappgeo.2020.104069>.
22. Di Giuseppe M.G., Troiano A., Patella D., Piochi M., Carlino S. A geophysical k-means cluster analysis of the Solfatara-Pisciarelli volcano-geothermal system, Campi Flegrei (Naples, Italy) // *Journal of Applied Geophysics*. 2018. Vol. 156. P. 44–54. <https://doi.org/10.1016/j.jappgeo.2017.06.001>.
23. Lindsey C.R., Neupane G., Spycher N., Fairley J.P., Dobson P., Wood T., et al. Cluster analysis as a tool for evaluating the exploration potential of Known Geothermal Resource Areas // *Geothermics*. 2018. Vol. 72. P. 358–370. <https://doi.org/10.1016/j.geothermics.2017.12.009>.
24. Langer H., Falsaperla S., Hammer C. Advantages and pitfalls of pattern recognition: selected cases in geophysics. Amsterdam: Elsevier, 2020. 333 p.
25. Спичак В.В. Электромагнитная томография земных недр. М.: Научный мир, 2019. 373 с.
26. Spichak V.V., Geiermann J., Zakharova O., Calcagno P., Genter A., Schill E. Estimating deep temperatures in the Soultz-sous-Forêts geothermal area (France) from magnetotelluric data // *Near Surface Geophysics*. 2015. Vol. 13. Iss. 4. P. 397–408. <https://doi.org/10.3997/>



1873-0604.2015014.

27. Spichak V., Zakharova O. Permeability estimating beyond boreholes from electrical conductivity data determined from magnetotelluric sounding: Soultz-sous-Forêts site (France) case study // *Geothermics*. 2022. Vol. 105.

P. 102513. <https://doi.org/10.1016/j.geothermics.2022.102513>.

28. Davies D.L., Bouldin D.W. A cluster separation measure // *IEEE Transactions on Pattern Analysis and Machine Intelligence*. 1979. Vol. PAMI-1. Iss. 2. P. 224–227. <https://doi.org/10.1109/TPAMI.1979.4766909>.

References

1. Manzella A., Serra D., Cesari G., Bargiavchi E., Cei M., Cerutti P., et al. Geothermal energy use, country update for Italy. In: *European Geothermal Congress 2019*. 11–14 June 2019, Den Haag. Den Haag; 2019, p. 1–19.

2. Olasolo P., Juárez M.C., Morales M.P., D'Amico S., Liarte I.A. Enhanced geothermal systems (EGS): a review. *Renewable and Sustainable Energy Reviews*. 2016;56: 133-144. <https://doi.org/10.1016/j.rser.2015.11.031>.

3. Fridleifsson G.O., Bogason S.G., Stoklosa A.W., Ingolfsson H.P., Vergnes P., Thorbjörnsson I.Ö., et al. Deployment of deep enhanced geothermal systems for sustainable energy business. In: *European Geothermal Congress 2016*. 19–24 September 2016, Strasbourg. Strasbourg; 2016, p. 1–8.

4. Koelbel T., Genter A. Enhanced geothermal systems: the Soultz-sous-Forêts project. In: Uyar T. (ed.). *Towards 100 % Renewable Energy*. Cham: Springer; 2017, p. 243–248.

5. Muñoz G. Exploring for geothermal resources with electromagnetic methods. *Surveys in Geophysics*. 2014; 35:101-122. <https://doi.org/10.1007/s10712-013-9236-0>.

6. Amatyakul P., Wood S.H., Rung-arunwan T., Vachiriatienchai C., Prommakorn N., Chanapiwat P., et al. An assessment of a shallow geothermal reservoir of Mae Chan hot spring, northern Thailand via magnetotelluric surveys. *Geothermics*. 2021;95:102137. <https://doi.org/10.1016/j.geothermics.2021.102137>.

7. Bertrand E., Caldwell T.G., Hill G.J., Bennie S.L. 3-D inversion of a 200+ site magnetotelluric array for deep geothermal exploration. In: *5th International Symposium on Three-Dimensional Electromagnetics*. 7–9 May 2013, Sapporo. Sapporo; 2013, p. 1–3.

8. Heise W., Caldwell T.G., Bibby H.M., Bannister S.C. Three-dimensional modelling of magnetotelluric data from the Rotokawa geothermal field, Taupo Volcanic Zone, New Zealand. *Geophysical Journal International*. 2008;173(2): 740-750. <https://doi.org/10.1111/j.1365-246X.2008.03737.x>.

9. Maryadi M., Firdaus A., Zarkasyi A., Mizunaga H. Electrical resistivity structure of Danau Ranau geothermal prospect area based on integrated 3-D inversion of impedance tensor and tipper vector. *Geothermics*. 2022;106: 102575. <https://doi.org/10.1016/j.geothermics.2022.102575>.

10. Pace F., Martí A., Queralt P., Santilano A., Manzella A., Ledo J., et al. Three-dimensional magnetotelluric characterization of the Travale geothermal field (Italy). *Remote Sensing*. 2022;14(3):542. <https://doi.org/10.3390/rs14030542>.

11. Peacock J.R., Mangan M.T., McPhee D., Wannamaker P.E. Three-dimensional electrical resistivity model of the hydrothermal system in Long Valley Caldera, California from magnetotellurics. *Geophysical Research Letters*. 2016;43(15):7953-7962. <https://doi.org/10.1002/>

2016GL069263.

12. Uchida T. Three-dimensional magnetotelluric investigation in geothermal fields in Japan and Indonesia. In: *World Geothermal Congress 2005*. 24–29 April 2005, Antalya. Antalya; 2005, p. 1–12.

13. Wannamaker P.E., Jiracek G.R., Stodt J.A., Caldwell T.G., Gonzales V.M., McKnight J.D., et al. Fluid generation and pathways beneath an active compressional orogen, the New Zealand Southern Alps, inferred from magnetotelluric data. *Journal of Geophysical Research: Solid Earth*. 2002;107(B6):6–20. <https://doi.org/10.1029/2001JB000186>.

14. Heap M.J., Kushnir A.R., Gilg H.A., Violay M.E., Harlé P., Baud P. Petrophysical properties of the Muschelkalk from the Soultz-sous-Forêts geothermal site (France), an important lithostratigraphic unit for geothermal exploitation in the Upper Rhine Graben. *Geothermal Energy*. 2019;7:27. <https://doi.org/10.1186/s40517-019-0145-4>.

15. Gola G., Bertini G., Bonini M., Botteghi S., Brogi A., De Franco R., et al. Data integration and conceptual modelling of the Larderello geothermal area, Italy. *Energy Procedia*. 2017;125:300-309. <https://doi.org/10.1016/j.egypro.2017.08.201>.

16. Oka D., Tamura M., Mogi T., Nakagawa M., Takahashi H., Ohzono M., et al. Conceptual model of supercritical geothermal system in Shiribeshi Region, Hokkaido, Japan. *Geothermics*. 2023;108:102617. <https://doi.org/10.1016/j.geothermics.2022.102617>.

17. Spichak V.V. Modern methods for joint analysis and inversion of geophysical data. *Geologiya i geofizika*. 2020;61(3):422-443. (In Russ.). <https://doi.org/10.15372/GiG2019092>.

18. Moorkamp M., Lelièvre P.G., Linde N., Khan A. *Integrated imaging of the Earth: Theory and applications*. New Jersey: John Wiley & Sons; 2016. 253 p.

19. Bauer K., Muñoz G., Moeck I. Pattern recognition and lithological interpretation of collocated seismic and magnetotelluric models using self-organizing maps. *Geophysical Journal International*. 2012;189(2):984-998. <https://doi.org/10.1111/j.1365-246X.2012.05402.x>.

20. Brehme M., Bauer K., Nukman M., Regenspurg S. Self-organizing maps in geothermal exploration – a new approach for understanding geochemical processes and fluid evolution. *Journal of Volcanology and Geothermal Research*. 2017;336:19-32. <https://doi.org/10.1016/j.jvolgeores.2017.01.013>.

21. Carollo A., Capizzi P., Martorana R. Joint interpretation of seismic refraction tomography and electrical resistivity tomography by cluster analysis to detect buried cavities. *Journal of Applied Geophysics*. 2020;178:104069. <https://doi.org/10.1016/j.jappgeo.2020.104069>.



22. Di Giuseppe M.G., Troiano A., Patella D., Piochi M., Carlino S. A geophysical *k*-means cluster analysis of the Solfatara-Pisciarelli volcano-geothermal system, Campi Flegrei (Naples, Italy). *Journal of Applied Geophysics*. 2018;156:44-54. <https://doi.org/10.1016/j.jappgeo.2017.06.001>.

23. Lindsey C.R., Neupane G., Spycher N., Fairley J.P., Dobson P., Wood T., et al. Cluster analysis as a tool for evaluating the exploration potential of Known Geothermal Resource Areas. *Geothermics*. 2018;72:358-370. <https://doi.org/10.1016/j.geothermics.2017.12.009>.

24. Langer H., Falsaperla S., Hammer C. *Advantages and pitfalls of pattern recognition: selected cases in geophysics*. Amsterdam: Elsevier; 2020. 333 p.

25. Spichak V.V. *Electromagnetic tomography of the Earth's interior*. Moscow: Nauchnyi mir; 2019. 373 p.

(In Russ.).

26. Spichak V.V., Geiermann J., Zakharova O., Calcagno P., Genter A., Schill E. Estimating deep temperatures in the Soultz-sous-Forêts geothermal area (France) from magnetotelluric data. *Near Surface Geophysics*. 2015;13(4):397-408. <https://doi.org/10.3997/1873-0604.2015014>.

27. Spichak V., Zakharova O. Permeability estimating beyond boreholes from electrical conductivity data determined from magnetotelluric sounding: Soultz-sous-Forêts site (France) case study. *Geothermics*. 2022;105:102513. <https://doi.org/10.1016/j.geothermics.2022.102513>.

28. Davies D.L., Bouldin D.W. A cluster separation measure. *IEEE Transactions on Pattern Analysis and Machine Intelligence*. 1979;PAMI-1(2):224-227. <https://doi.org/10.1109/TPAMI.1979.4766909>.

Информация об авторах / Information about the authors



Ненюкова Алёна Игоревна,

студентка,
Российский государственный геологоразведочный
университет им. Серго Орджоникидзе,
г. Москва, Россия,
nenyukovaai@mail.ru

Alena I. Nenyukova,

Student,
Sergo Ordzhonikidze Russian State University for Geological Prospecting,
Moscow, Russia,
nenyukovaai@mail.ru



Спичак Вячеслав Валентинович,

доктор физико-математических наук,
академик Российской академии естественных наук,
заведующий Лабораторией методологии интерпретации
электромагнитных данных,
Центр геоэлектромагнитных исследований – филиал
Института физики Земли им. О.Ю. Шмидта РАН,
г. Троицк, г. Москва, Россия

✉ v.spichak@mail.ru

<https://orcid.org/89262243578>

Vyacheslav V. Spichak,

Dr. Sci. (Phys.-Math.),
Academician of the Russian Academy of Natural Sciences,
Head of the Laboratory of Electromagnetic Data Interpretation Methodology,
Center for Geoelectromagnetic Research – branch of the
Schmidt Institute of Physics of the Earth RAS,
Troitsk, Moscow, Russia

✉ v.spichak@mail.ru

<https://orcid.org/89262243578>

Вклад авторов / Contribution of the authors

Все авторы сделали эквивалентный вклад в подготовку публикации.
The authors contributed equally to this article.

Конфликт интересов / Conflict of interests

Авторы заявляют об отсутствии конфликта интересов.
The authors declare no conflicts of interests.



*Все авторы прочитали и одобрили окончательный вариант рукописи.
The final manuscript has been read and approved by all the co-authors.*

Информация о статье / Information about the article

Статья поступила в редакцию 28.01.2023; одобрена после рецензирования 10.02.2023; принята к публикации 28.02.2023.

The article was submitted 28.01.2023; approved after reviewing 10.02.2023; accepted for publication 28.02.2023.



Научная статья

УДК 556.334.5

<https://doi.org/10.21285/2686-9993-2023-46-1-20-35>

Моделирование гидродинамического режима техногенного водоносного горизонта в пределах участка «Ноябрьский» рудника «Айхал»

А.М. Янников^{а,в}, А.С. Стручкова^б, А.Ю. Корепанов^с^{а-с}Институт «Якутнипроалмаз» АК «АЛРОСА» (ПАО), г. Мирный, Россия

Резюме. Участок «Ноябрьский» используется для закачки дренажных высокоминерализованных вод, образующихся при разработке кимберлитовой трубки «Айхал» (Республика Саха (Якутия), Россия). Производимая с 2013 г. в скважины участка закачка вод привела к формированию локализованного внутримерзлотного техногенного водоносного горизонта. Учитывая фильтрационные параметры формируемых коллекторов толщи многолетнемерзлых пород, а также подтвержденную полезную емкость участка, его эксплуатацию планируют вести как минимум до 2044 г. Несмотря на сравнительно небольшие объемы закачки (до 430 м³/сут.), прогнозирование динамики изменения гидродинамического режима техногенного горизонта является интересной задачей, обладающей большой практической значимостью для обеспечения экологической и промышленной безопасности. Оценка техногенного влияния, а также последующее прогнозирование динамики гидродинамического режима в пределах участка «Ноябрьский» были осуществлены методами моделирования в программном обеспечении Modflow. В настоящее время сформированная линза рассолов характеризуется неравномерными фильтрационными параметрами, что обусловлено особенностями тепло- и массопереноса при использовании толщи многолетнемерзлых пород для закачки дренажных вод. На основе результатов прогнозного моделирования можно сделать вывод, что использование метода закачки дренажных вод рудника «Айхал» в толще многолетнемерзлых пород на участке «Ноябрьский» позволяет уменьшить степень влияния горных и добычных работ как на геологическую среду изучаемого района посредством локализации ее на планомерно ограниченном сравнительно небольшом по площади участке, на котором непосредственно осуществляется закачка, так и на окружающую среду посредством исключения попадания в поверхностные воды дренажных рассолов до 2044 г.

Ключевые слова: многолетнемерзлые породы, рассолы, техногенный водоносный горизонт, дренажные воды, Айхал

Для цитирования: Янников А.М., Стручкова А.С., Корепанов А.Ю. Моделирование гидродинамического режима техногенного водоносного горизонта в пределах участка «Ноябрьский» рудника «Айхал» // Науки о Земле и недропользование. 2023. Т. 46. № 1. С. 20–35. <https://doi.org/10.21285/2686-9993-2023-46-1-20-35>.

Original article

Modeling hydrodynamic regime of the technogenic aquifer within the Noyabrsky site of the Aikhal mine

Aleksey M. Yannikov^{а,в}, Agita S. Struchkova^б, Aleksey Yu. Korepanov^с^{а-с}"Yakutnioproalmaz" Institute, PJSC "ALROSA", Mirny, Russia

Abstract. The Noyabrsky site is used for the injection of highly mineralized drainage waters formed during the development of the Aikhal kimberlite pipe (Republic of Sakha (Yakutia), Russia). The water injected into the wells of the site since 2013 has formed a localized intrapermafrost technogenic aquifer. Taking into account the porosity parameters of the formed permafrost reservoirs, as well as the confirmed useful capacity of the site, its operation is planned to continue until 2044 at the very least. Despite relatively small injection volumes (up to 430 m³/day), forecasting dynamical changes in the hydrodynamic regime of the technogenic water horizon is a challenging task, which is of significant practical importance for the provision of environmental and industrial safety. The assessment of the anthropogenic impact, as well as the subsequent forecasting of the hydrodynamic regime dynamics within the Noyabrsky site, were carried out by modeling methods in the Modflow software. The brine lens formed today is characterized by uneven porosity parameters, which is due to the peculiarities of heat and mass transfer when using permafrost for drainage water injection. Based on the results of predictive modeling a conclusion can be derived that the use of the method of Aikhal mine drainage water injection into the permafrost strata at the Noyabrsky site allows to reduce the influence degree of mining and production operations on the geological

© Янников А.М., Стручкова А.С., Корепанов А.Ю., 2023



environment of the studied area through its localization on an intentionally limited, relatively small area, where injection is carried out, as well as on the environment, by preventing drainage brines from entering surface waters until 2044.

Keywords: permafrost, brines, technogenic aquifer, drainage waters, Aikhal

For citation: Yannikov A.M., Struchkova A.S., Korepanov A.Yu. Modeling hydrodynamic regime of the technogenic aquifer within the Noyabrsky site of the Aikhal mine. *Nauki o Zemle i nedropol'zovanie* = *Earth sciences and subsoil use*. 2023;46(1):20-35. (In Russ.). <https://doi.org/10.21285/2686-9993-2023-46-1-20-35>.

Введение

В последние два десятилетия методы математического моделирования стали одним из основных инструментов изучения гидрогеологических процессов и начали повсеместно использоваться при решении научных и практических задач как в России, так и за рубежом [1]. Современные программные продукты дают возможность создавать многослойные гидрогеологические модели, имитирующие трехмерную пространственную миграцию и фильтрацию вод с точностью, позволяющей делать прогнозы о дальнейших изменениях, происходящих в результате техногенной нагрузки, и последующем взаимодействии с геологической средой.

Трубка «Айхал» (Республика Саха (Якутия), Россия) приурочена к Алаakit-Мархинскому кимберлитовому полю. Отрабатывалась открытым способом с 1961 по 1997 гг. до глубины 325–380 м (абсолютная отметка +195...+235 м) при частичном вскрытии нижнеордовикского водоносного комплекса [2]. В настоящее время разрабатывается подземным способом, проектом предусмотрена разработка до глубины 900 м от дневной поверхности.

Коренные месторождения алмазов, отрабатываемые АК «АЛРОСА» в рамках Якутской алмазоносной провинции, имеют повсеместное обводнение различной интенсивности подмерзлотными и межмерзлотными рассолами [3]. Оработка месторождений связана с образованием дренажных вод, которые оказывают значительное воздействие на природную и геологическую среды. Для экологически безопасной эксплуатации на руднике «Айхал» производится закачка дренажных вод в существующие и формируемые емкости коллекторов в толщах многолетнемерзлых пород. Закачка дренажных вод приводит к формированию техногенного водоносного горизонта, локализованного в пределах участка закачки.

Опыт использования многолетнемерзлых пород для закачки указывает на создание до-

статочно сложных природно-техногенных систем [4, 5], изучение которых является важной прикладной задачей для заблаговременного выявления потенциальных рисков различного характера и формирования необходимого инструментария технологий и технических решений, направленных на минимизацию или локализацию техногенного воздействия вплоть до полного исключения негативных последствий.

Целью проводимых исследований являлось создание цифровой модели участка закачки дренажных вод «Ноябрьский» рудника «Айхал» с точностью, позволяющей прогнозировать изменения криогидрогеологических условий, а также оценивать степень техногенной нагрузки на геологическую среду и экологические риски.

Материалы и методы исследования

Участок «Ноябрьский» находится в бассейне реки Сохсоллоох, в пределах Алаakit-Мархинского кимберлитового поля, расположенного в юго-западной части Далдыно-Алаakitского алмазоносного района [6]. В геоморфологическом отношении район участка представляет собой водораздельную часть структурно-денудационного плато рек Сохсоллоох и Ойюр-Юреге.

В геолого-стратиграфическом разрезе изучаемой толщи участка принимают участие палеозойские осадочные образования: карбонатно-терригенные отложения онхойюряхской свиты (кембрийская система); олдондинской, сохсоллоохской, сытыканской и кылахской свит (ордовикская система); байтахской и башенной свит (силурийской системы); айхальской свиты (каменноугольной системы). Осадочные породы перекрыты трапповым полем (мощностью 76–93 м) позднепалеозойско-раннемезозойского периода (P_2-T_1), образованным внедрением магмы основного состава: долеритами, слагающими крупные пластовые тела интрузий и дайки, а также туфами (рис. 1, 2) [7].

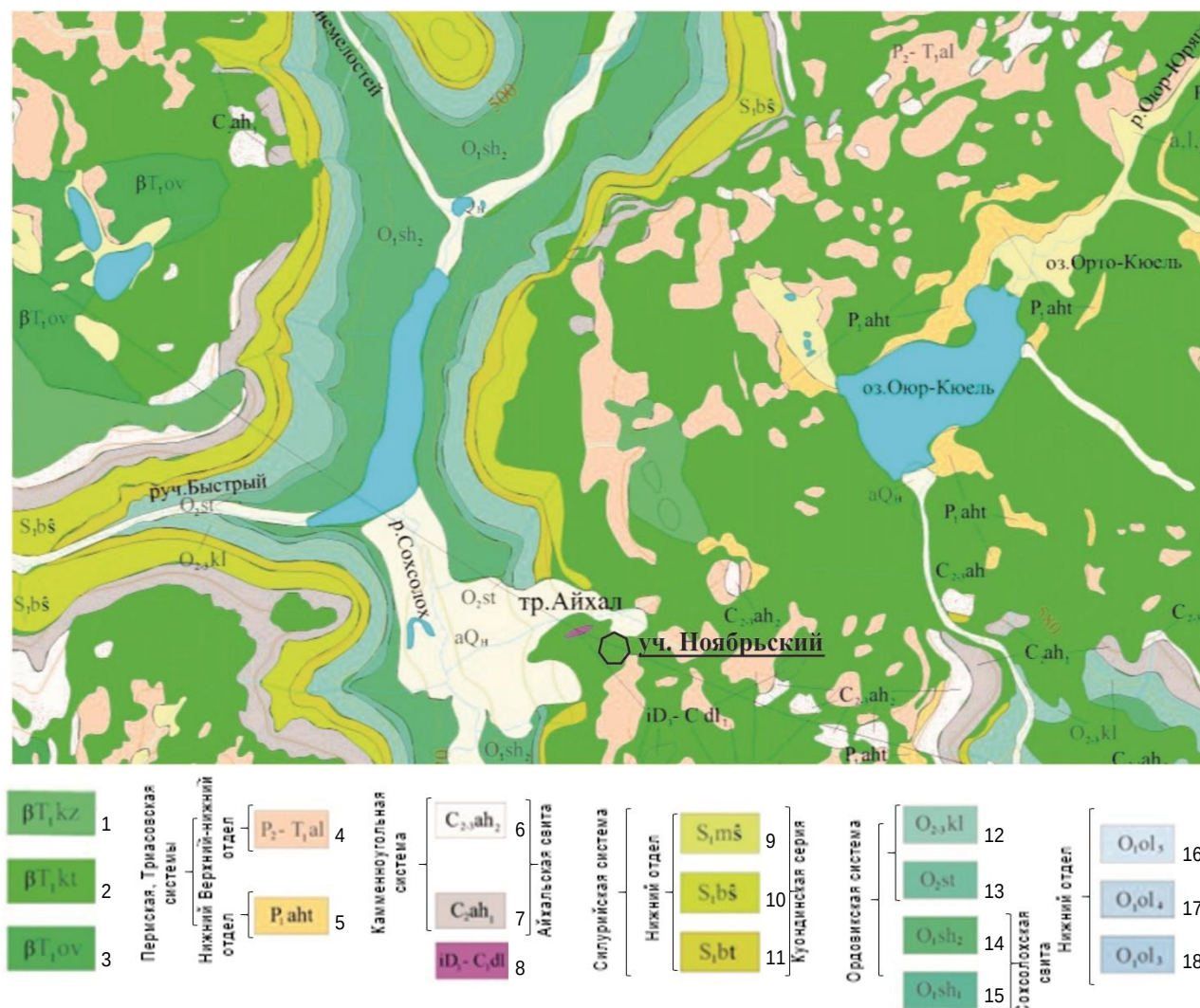


Рис. 1. Фрагмент геологической карты Алаkit-Мархинского кимберлитового поля (по материалам Ботубунинской и Мирнинской геолого-разведочных экспедиций):

- 1 – кузьмовский комплекс феррогаббро-долеритовый; 2 – катангский комплекс долеритовый; 3 – оленек-велинггинский комплекс габбро-долеритов и такситовых долеритов; 4 – алаkitская свита: туфы основного состава, ксенотуфы, туффиты, туфопесчаники, туфоалевролиты, потоки базальтов, песчаники, прослои алевролитов, аргиллитов, линзы углей (0–120 м); 5 – ахтарандинская свита: песчаники, прослои алевролитов, аргиллитов, углистых сланцев, линзы углей, гравелитов, конгломератов (30–75 м); 6 – айхальская свита, верхняя подсвита: песчаники, алевролиты, прослои аргиллитов, углистых алевролитов и сланцев, линзы углей, конгломератов (10–60 м); 7 – айхальская свита, нижняя подсвита: песчаники, алевролиты, углистые алевролиты и аргиллиты, прослои углисто-глинистых сланцев, углей, линзы конгломератов (30–50 м); 8 – далдыно-алаkitский комплекс кимберлитовый; 9 – машковская свита: органогенные и органогенно-детритовые известняки, прослои глинистых и алевритистых известняков (70–90 м); 10 – башенная свита: криптозернистые известняки, прослои мергелей, органогенно-обломочных и глинистых известняков (40–60 м); 11 – байтахская свита: зеленоцветные мергели, прослои аргиллитов, глинистых известняков, линзы плоскогалечных конгломератов (4–36 м); 12 – кылахская свита: пестроцветные мергели, алевритистые и глинистые доломиты, прослои органогенно-детритовых и глинистых известняков (27–42 м); 13 – сытыканская свита: известняки, песчанистые известняки, прослои кварцевых песчаников, мергелей, доломитов, линзы гравелитов (4–20 м); 14 – сохолохская свита, верхняя пачка: доломиты, известковистые песчаники, прослои и линзы строматолитовых, оолитовых и органогенно-обломочных известняков, мергелей, плоскогалечных конгломератов (35–50 м); 15 – сохолохская свита, нижняя пачка: доломиты глауконитовые, оолитовые и органогенно-обломочные прослои известняков, известковистых песчаников, мергелей, плоскогалечных конгломератов и осадочных брекчий (20–30 м); 16–18 – олдодинская свита: 16 – пятая пачка: доломиты, алевролиты, песчаники, мергели с гипсом, прослои известняков, водорослевых доломитов (40–60 м), 17 – четвертая пачка: доломиты, прослои водорослевых доломитов, плоскогалечных конгломератов, известняков с гипсом (40–50 м), 18 – третья пачка: доломиты, мергели с гипсом, прослои оолитовых строматолитовых доломитов, известняков (35–45 м)



**Fig. 1. A fragment of the geological map of the Alakit-Markha kimberlite field
(based on the materials of the Botuoba and Mirny geological exploration survey):**

1 – Kuzmovsky ferrogabbro-dolerite complex; 2 – Katanga dolerite complex; 3 – Olenek-Velingna complex of gabbro-dolerites and taxite dolerites; 4 – Alakit formation: basic tuffs, xenotuffs, tuffites, tuff sandstones, tuff siltstones, basalt flows, sandstones, interbedded siltstones and argillites, coal lenses (0–120 m); 5 – Akhtaranda formation: sandstones, interbedded siltstones and argillites, carbonaceous shales, lenses of coals, gravelstones, conglomerates (30–75 m); 6 – Aikhal formation, Upper subformation: sandstones, siltstones, embedded argillites, carbonaceous siltstones and shales, lenses of coals, conglomerates (10–60 m); 7 – Aikhal formation, Lower subformation: sandstones, siltstones, carbonaceous siltstones and argillites, embedded carbonaceous argillaceous shales, coals, lenses of conglomerates (30–50 m); 8 – Daldyn-Alakit kimberlite complex; 9 – Mashkovskaya formation: organogenic and organic-detrital limestones, embedded clayey and silty limestones (70–90 m); 10 – Tower formation: crypto-granular limestones, embedded marls, organogenic detrital and clayey limestones (40–60 m); 11 – Baitakh formation: green marls, embedded argillites, clayey limestones, lenses of flat pebble conglomerates (4–36 m); 12 – Kylakh formation: variegated marls, silty and clayey dolomites embedded organogenic-detrital and clayey limestones (27–42 m); 13 – Sytykan formation: limestones, sandy limestones, embedded quartz sandstones, marls, dolomites, lenses of gravelstones (4–20 m); 14 – Sokhsolokh formation, top bench: dolomites, calcareous sandstones, interlayers and lenses of stromatolitic, oolitic and organogenic-detrital limestones, marls, flat pebble conglomerates (35–50 m); 15 – Sokhsolokh formation, lower bench: glauconite dolomites, oolitic and organogenic-detrital interlayers of limestones, calcareous sandstones, marls, flat pebble conglomerates and sedimentary breccias (20–30 m); 16–18: Oldodinskaya formation: 16 – 5th bench: dolomites, siltstones, sandstones, marls and gypsum, embedded limestones and algal dolomites (40–60 m), 17 – 4th bench: dolomites, embedded algal dolomites, flat pebble conglomerates, limestones and gypsum (40–50 m), 18 – 3^d bench: dolomites, marls and gypsum, embedded oolitic stromatolitic dolomites, limestones (35–45 m)

Структурно-тектоническое строение участка изучено по результатам бурения гидрогеологических, структурных и поисково-разведочных скважин в сочетании с комплексом геофизических исследований скважин, наземными геофизическими исследованиями. На рассматриваемой территории широко развиты субширотные разломы, контролирующие кимберлитовый магматизм. В структурно-тектоническом отношении весь участок приурочен к зоне динамического воздействия Ноябрьского глубинного разлома, относящегося к группе чукукских разломов. В пределах участка сформирована система оперяющих разломов, имеющих подчиненное положение. Необходимо отметить, что данный разлом относится к кимберлитконтролирующим для таких трубок, как Заря, Надежда, Ноябрьская и Подтраповая. Из перечисленных кимберлитовых тел только трубка Заря имеет промышленные содержания алмазов, остальные характеризуются убогой алмазоносностью [8].

Подземные воды района исследований разделяются на над-, меж- и подмерзлотные. В районе месторождения надмерзлотные воды представлены водами сезонно-талого слоя, водами гидрогенных подрусловых и подозерных таликов. Подмерзлотные воды представлены четырьмя водоносными комплексами: верхне-, средне-, нижнекембрийским и верхнепротерозойским. Межмерзлот-

ные воды представлены нижнеордовикским межмерзлотным водоносным комплексом. Данный комплекс характеризуется спорадичностью распространения, наличием мерзлых пород выше и ниже обводненной части разреза, незначительным напором подземных вод и крайне низкой водообильностью отложений [7]. Кровлей комплекса служит мощная толща замороженных пород от нижнего ордовика до пермо-карбона, а подошвой – многолетнемерзлые породы верхнего кембрия. Воды комплекса вскрываются на отметках +260...+70 м. Подмерзлотный верхнекембрийский водоносный комплекс приурочен к отложениям мархинской и моркокинской свит и представлен переслаиванием мергелей, глинистых известняков, доломитов [8, 9]. Подземные горные выработки рудника «Айхал» вскрывают на полную мощность ордовикский межмерзлотный водоносный комплекс. При дальнейшей эксплуатации рудника будет вскрыт верхнекембрийский водоносный комплекс.

Согласно техническому проекту промышленной эксплуатации узла закачки дренажных вод рудника «Айхал» (ответственным исполнителем которого является А.М. Янников), на участке «Ноябрьский» было пробурено девятнадцать скважин, в том числе:

– шесть закачных скважин (№ 101, 102, 103, 104, 105, 106) глубиной по 230 м;

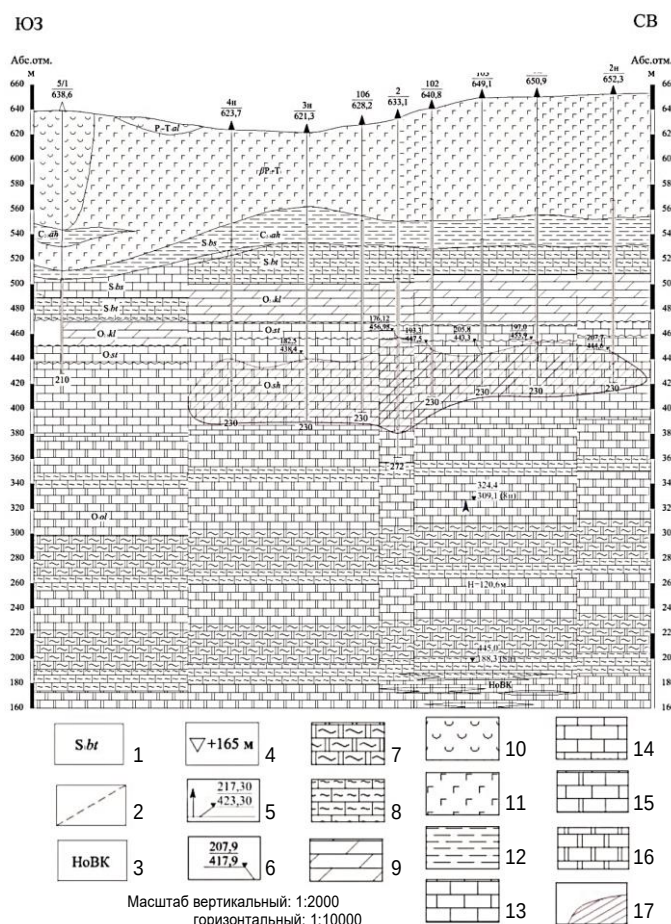


Рис. 2. Геолого-гидрогеологический разрез по участку «Ноябрьский»:

1 – геологический возраст; 2 – нарушение разрывного типа; 3 – межмерзлотный нижнеордовикский водоносный комплекс; 4 – кровля нижнеордовикского межмерзлотного водоносного комплекса; 5 – уровень подземных вод и его напор; 6 – уровень подземных вод на 21 декабря 2020 г.; 7 – доломит глинистый; 8 – известняк глинистый; 9 – мергель; 10 – туфы; 11 – долериты; 12 – алевролит песчанистый; 13 – известняк; 14 – известняк песчанистый; 15 – доломит известковистый; 16 – доломит; 17 – техногенный водоносный горизонт

Fig. 2. Geological and hydrogeological section of the Noyabrskiy site:

1 – geological age; 2 – discontinuous faulting; 3 – interpermafrost Lower Ordovician aquifer; 4 – roofing of the Lower Ordovician interpermafrost aquifer; 5 – level and pressure of groundwater; 6 – groundwater level as of December 21, 2020; 7 – clayey dolomite; 8 – clayey limestone; 9 – marl; 10 – tuffs; 11 – dolerites; 12 – sandy siltstone; 13 – limestone; 14 – sandy limestone; 15 – calcareous dolomite; 16 – dolomite; 17 – technogenic aquifer

– тринадцать наблюдательных скважин, из которых семь (№ 1н, 2н, 3н, 4н, 5н, 6н, 9н) имеют глубину по 230 м, четыре (№ 1, 2, 5/1, 5/2) – глубину по 250 м, одна (№ 7н) – глубину 400 м, и еще одна (№ 8н) – глубину 600 м (рис. 3).

Оценка техногенного влияния, а также последующее прогнозирование динамики изменения гидродинамического режима в пределах шахтного поля трубки Айхал и участка «Ноябрьский» были осуществлены методами моделирования в программном обеспечении Modflow. Уравнение фильтрации принято за основу при построении модели фильтрации в

районе участков закачки дренажных вод. Для однозначности решения оно дополняется начальными и граничными условиями, определяющими природные условия питания и разгрузки, а также технологические показатели системы закачки рассолов [10]. В качестве метода гидрогеологических исследований используется численное моделирование пространственных задач геофильтрации методом конечных разностей. В плане область фильтрации разбита на блоки. В разрезе вся толща пород разбивается на слои, отражающие особенности строения водоносного горизонта. Для построения модели размеры обла-

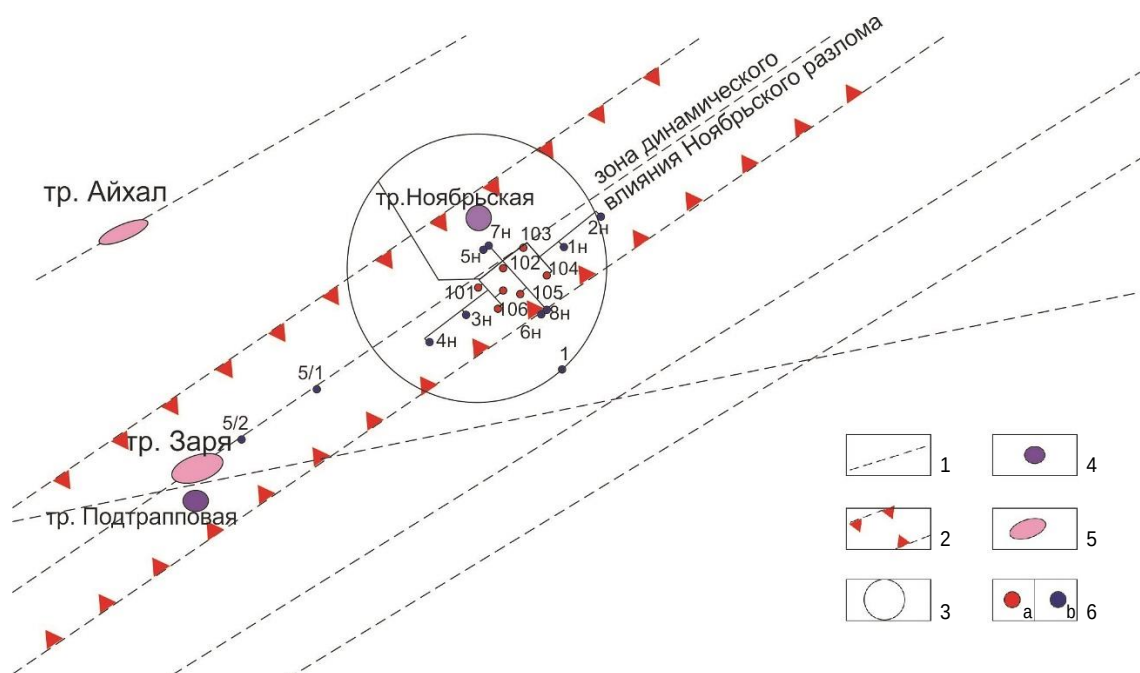


Рис. 3. Структурно-тектоническая схема участка закачки «Ноябрьский» (составлена по материалам Мирнинской геолого-разведочной экспедиции и Айхальского горно-обогатительного комбината):

1 – кимберлитконтролирующие разрывные нарушения; 2 – зона динамического воздействия Ноябрьского разлома; 3 – горный отвод участка «Ноябрьский»; 4 – непромышленные кимберлитовые трубки; 5 – промышленные кимберлитовые трубки; 6 – скважины: а – закачные, b – наблюдательные

Fig. 3. Structural and tectonic diagram of the Noyabrsk injection site (compiled on the materials of the Mirny geological exploration survey and the Aikhal mining and processing plant):

1 – kimberlite–controlling faults; 2 – zone of Noyabrsk fault dynamic impact; 3 – located claim of the Noyabrsk site; 4 – non-commercial kimberlite pipes; 5 – production kimberlite pipes; 6 – wells: a – injection wells, b – observation wells

сти приняты такими, чтобы на весь прогнозный период моделирования внешние границы не оказывали существенного влияния на реакцию модели при возмущении на участках закачки рассолов. Область моделирования принята размером $3 \times 3 \text{ км}^2$. В соответствии с методикой моделирования область разбита в плане на квадратные блоки размером $\Delta x = \Delta y = 10 \text{ м}$. Число блоков в одном слое составляет $300 \cdot 300 = 90000$. В соответствии с зональностью фильтрационных свойств многолетнемерзлых пород в разрезе и необходимостью учета нижнеордовикского межмерзлотного водоносного комплекса толща пород на модели представлена тремя слоями:

- первый слой (верхний) отражает на модели интервал многолетнемерзлых пород, приуроченный к породам трапповой формации;
- второй слой – интервал многолетнемерзлых пород в абсолютных отметках $+400 \dots +200 \text{ м}$;
- третий слой – комплекс пород в интервале $+200 \dots +120 \text{ м абс.}$, к которым приурочен нижнеордовикский водоносный комплекс.

Решение обратной задачи выполнялось методом целенаправленного подбора параметров (методом итераций), при котором учитывались представления о геолого-гидрогеологических особенностях водоносных горизонтов, данные фильтрационных исследований водопроницаемости пород и их емкостных свойства. Так как в данном случае высока степень неопределенности значений водопроводящих и емкостных свойств пород, целью решения обратной задачи является подбор расчетных значений фильтрационных (коэффициентов фильтрации) и емкостных (недостаток насыщения и упругая водоотдача) параметров водоносных горизонтов так, чтобы заданным расходом закачки рассолов модельное пространственно-временное распределение уровней с приемлемой точностью согласовывалось с фактическим распределением [11–13]. Идентификация фильтрационных параметров для таких условий представляет собой сложную задачу как в теоретическом плане, так и с точки зрения современных технических возможностей (в настоящее время



нет программного обеспечения для моделирования задач подобного класса). В связи с этим при решении обратной задачи использовался общий подход к решению задач с переменными параметрами – метод последовательной смены квазистационарных состояний совместно с современными мерзлотно-гидрогеологическими представлениями о строении толщи многолетнемерзлых пород на участках закачки рассолов месторождений АК «АЛРОСА». В соответствии с представлениями о замкнутости центральной (наиболее проницаемой) части участка закачки первоначально выделены зоны коэффициентов фильтрации, максимальные значения которых расположены в центральной части с постепенным уменьшением к периферии. Конфигурация зон для слоев, отражающих многолетнемерзлые породы, принимались одинаковой, соответствующей тектоническим условиям. Для третьего слоя (нижнеордовикский межмерзлотный водоносный комплекс) коэффициенты фильтрации были приняты исходя из имеющихся данных о водопроводимости пласта и принятой на модели мощности. Дебит закачки принят по данным об объемах закачки рассолов в 2014–2022 гг. Оценка точности решения задачи выполнялась сравнением модельных значений уровней H_m с фактическими значениями H_f на конец 2021 г. по наблюдательным скважинам, расположенным на участке закачки «Ноябрьский».

При последовательном переборе параметров решение задачи закачки рассолов повторялось, анализировалось полученное решение и отклонение его от фактических данных. Для уменьшения отклонения решения задавались уточненные параметры, затем моделирование повторялось. Процесс итераций продолжался до тех пор, пока не достигалась приемлемая оценка средних отклонений (в пределах 5 %) [14].

Результаты исследования и их обсуждение

Согласно результатам проведенных гидрогеологических и геофизических исследований, породы, обладающие наилучшими коллекторскими свойствами («рабочие интервалы»), залегают:

- в скважине № 101 – на глубинах от 150 до 193 м;
- в скважине № 102 – на глубинах от 165 до 199 м;
- в скважине № 105 – на глубинах от 145 до 188 м;
- в скважине № 106 – на глубинах от 145 до 187 м.

Поглощающие интервалы представлены трещиноватыми известняками сохолохской свиты (O_{1sh}), трещиноватыми известняками и мергелем сытыканской свиты (O_{2st}) и трещиноватым, пестроцветным мергелем кылахской свиты (O_{2-3kl}). Наиболее проницаемые пласты-коллекторы, согласно результатам расходомерии, отмечены в интервале глубин 145–190 м. В настоящее время участок обратной закачки «Ноябрьский» эксплуатируется в опытно-промышленном режиме с суммарной производительностью закачки до 430 м³/сут. (фактически в течение 2018–2022 гг. – до 320 м³/сут.) в режиме свободного налива на базе шести поглощающих скважин. В результате закачки дренажных вод в пределах изучаемого участка началось формирование техногенного водоносного горизонта: линзовидного скопления вод, формируемого в результате прямой подачи рассолов через скважины в коллекторы толщи многолетнемерзлых пород. По состоянию на январь 2022 г. в толщу многолетнемерзлых пород участка «Ноябрьский» закачано около 300 тыс. м³ минерализованных дренажных вод рудника «Айхал», в связи с этим сформированная линза характеризуется невыдержанными фильтрационными параметрами, а также измененным химическим составом закачанных вод. Это связано с растворением жильного льда толщи многолетнемерзлых пород, что сопряжено с уменьшением суммарной минерализации техногенного водоносного горизонта. Наиболее проницаемые зоны расположены в непосредственной близости от скважин в радиусе 25–30 м. По опыту эксплуатации подобных участков закачки Удачинского горно-обогатительного комбината, для формирования более выдержанного водоносного горизонта необходима закачка 1,5–2 млн м³ минерализованных дренажных вод.

Наибольший объем закачки осуществлялся в скважины № 2, 103, 104 (рис. 4).

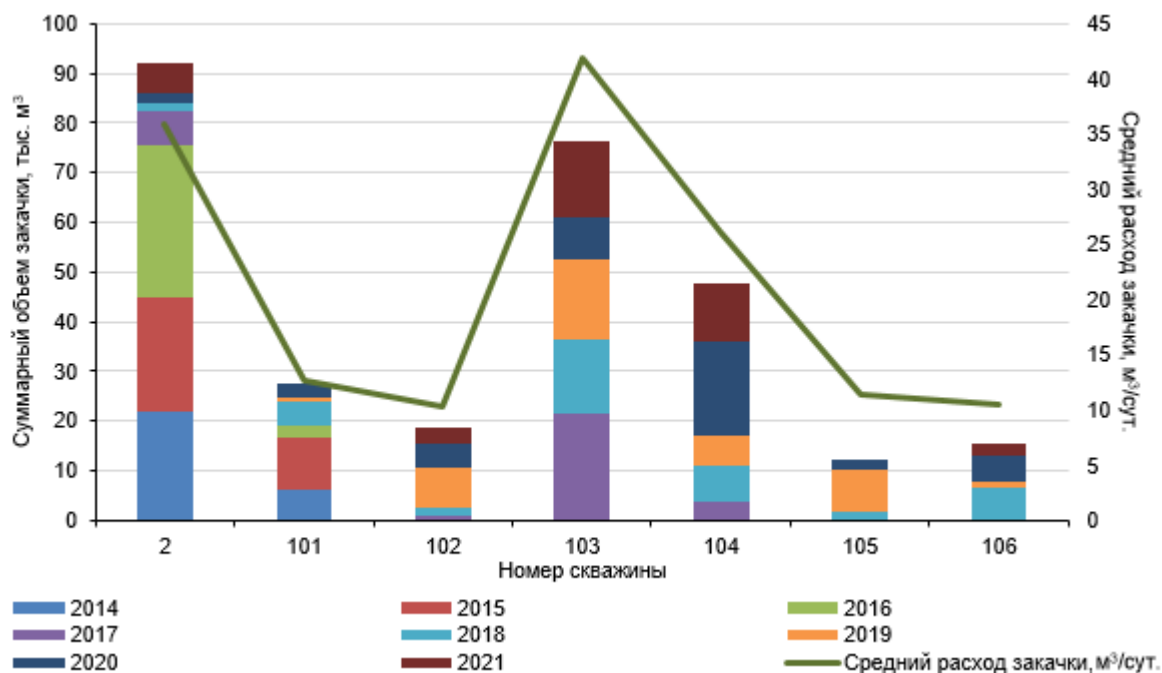


Рис. 4. Суммарные объемы закачки рассолов в эксплуатационные скважины участка «Ноябрьский»
Fig. 4. Total volumes of brine injection into production wells of the Noyabrskiy site

В настоящее время сформированная линза рассолов характеризуется неравномерными фильтрационными параметрами, что обусловлено особенностями тепло- и массопереноса при использовании толщи многолетнемерзлых пород для закачки дренажных вод [15, 16]. Существующим проектом на руднике предусмотрен отдельный сбор природных рассолов на горизонте +100 м, из водосборника горизонта рассолы перекачиваются на дневную поверхность в специальную емкость, откуда автомобильным транспортом доставляются на участок «Ноябрьский». В холодный период за время доставки рассолы успевают охладиться до температуры -10°C . При закачке данных рассолов в толщу многолетнемерзлых пород происходит формирование

поля пониженных температур, так как изначально температура многолетнемерзлых пород составляет $-3...-4^{\circ}\text{C}$, то есть при формировании техногенного водоносного горизонта образуется не талик, а своеобразный криопэг. Основные параметры закачки по скважинным приведены в табл. 1.

По данным опытно-фильтрационных работ, водопроводимость техногенного горизонта составляет $13-90 \text{ м}^2/\text{сут.}$, пьезопроводность – $n \cdot 10^4 \text{ м}^2/\text{сут.}$, что характерно для субнапорного либо безнапорного режима фильтрации (табл. 2).

Изменение уровня воды техногенного горизонта в толще многолетнемерзлых пород и уровня воды в нижнеордовикском межмерзлотном водоносном комплексе, по данным

Таблица 1. Основные параметры по опытным скважинам участка «Ноябрьский»
Table 1. Main parameters for pilot wells of the Noyabrskiy site

Номер скважины	Дебит налива, $\text{м}^3/\text{ч}$	Повышение уровня, м	Фактическое (полученное) давление на подошву поглощающих коллекторов, атм.	Расчетное (максимальное) давление на подошву поглощающих коллекторов, атм.	Удельное водопоглощение, $\text{м}^3/\text{ч}$ на 1 м
101	15	8,3	4,8	17	1,8
103	15	8	3,5	17	1,9
104	15	2,9	3,1	17	5,2
106	15	4,8	4,7	17	3,1



Таблица 2. Фильтрационно-емкостные параметры по опытным скважинам участка «Ноябрьский»
Table 2. Porosity and permeability of pilot wells of the Noyabrsky site

Номер скважины	Год	Водопроводимость, м ² /сут.	Пьезопроводность, м ² /сут.	Приемистость, м ³ /сут.
101	2018	27,7	$2,3 \cdot 10^5$	311–411
102	2019	52,3	$1,6 \cdot 10^4$	340,12
103	2020	89,87	$4,7 \cdot 10^4$	253,8
104	2020	59,64	$1,8 \cdot 10^4$	791,9
105	2019	12,98	$6 \cdot 10^3$	644
106	2018	61,5	800	281–682

режимных наблюдений, с учетом небольших объемов закачки не дает представления о распространении рассолов ниже выделенных коллекторов. На данном этапе закачки рассолов дренажные воды распространяются в основном по выделенным коллекторам, а также в свободном ото льда трещинном пространстве нижележащих толщ пород, что видно по понижению уровня в скважинах в периоды простоя между периодами закачки рассолов (рис. 5).

Распределение дренажных рассолов в плане можно проследить по появлению воды в наблюдательных скважинах, расположенных в периферийной части (рис. 6). В конце 2014 г. было отмечено появление подземных вод в скважинах 3н и 5н, расположенных в северной и западной частях исследуемого участка, с минерализацией 149 г/л. В 2018 г.

появление рассолов, в свою очередь, было отмечено в скважинах 1н (восточная часть) и 4н (западная часть) с минерализацией 143 и 65 г/л.

По последним данным (сентябрь 2022 г.), минерализация подземных вод, отобранных в скважинах участка закачки, составляет 60–80 г/л при средней минерализации закачиваемых рассолов в предыдущий год 100 г/л. С января по май закачка производилась в скважины 103, 104, что повлияло на минерализацию воды в скважине 1н. Основной объем закачки (70 %) производится с июня по ноябрь с минерализацией вод 66–87 г/л. Так как данная минерализация является равновесной при температуре многолетнемерзлых пород $-3...-2$ °С, то можно предположить, что на данный момент растекание вод происходит в основном по открытым трещинам (рис. 7) [17–19].

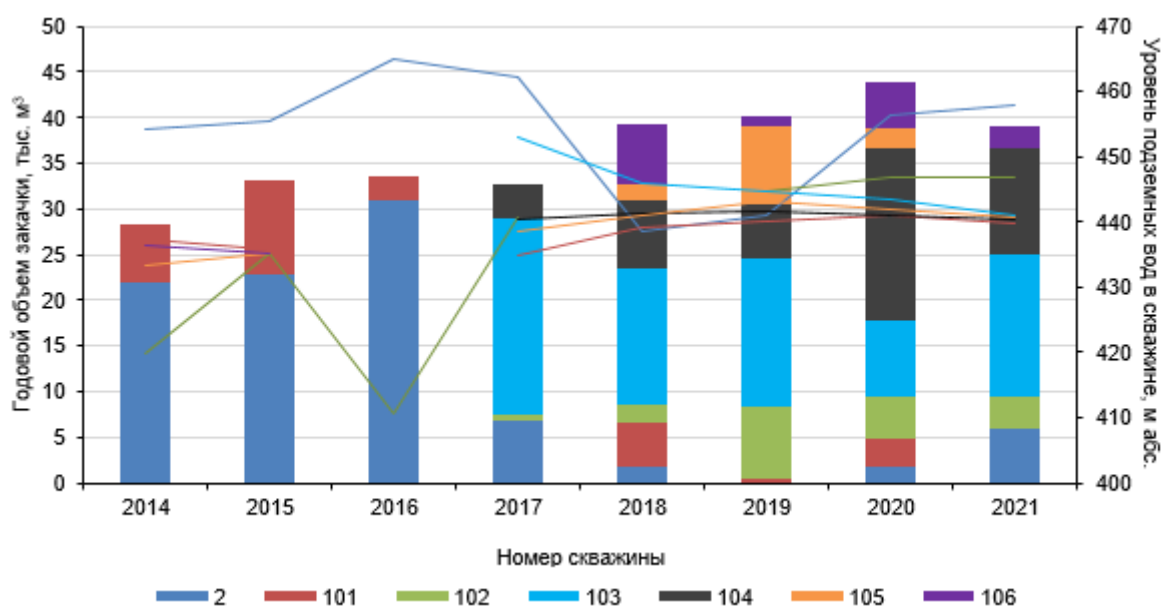


Рис. 5. Изменение уровня техногенного горизонта по замерам в эксплуатационных скважинах в зависимости от объемов закачки рассолов в многолетнемерзлые породы

Fig. 5. Variations of the technogenic horizon level according to the measurements in production wells depending on the volume of brine injection into permafrost

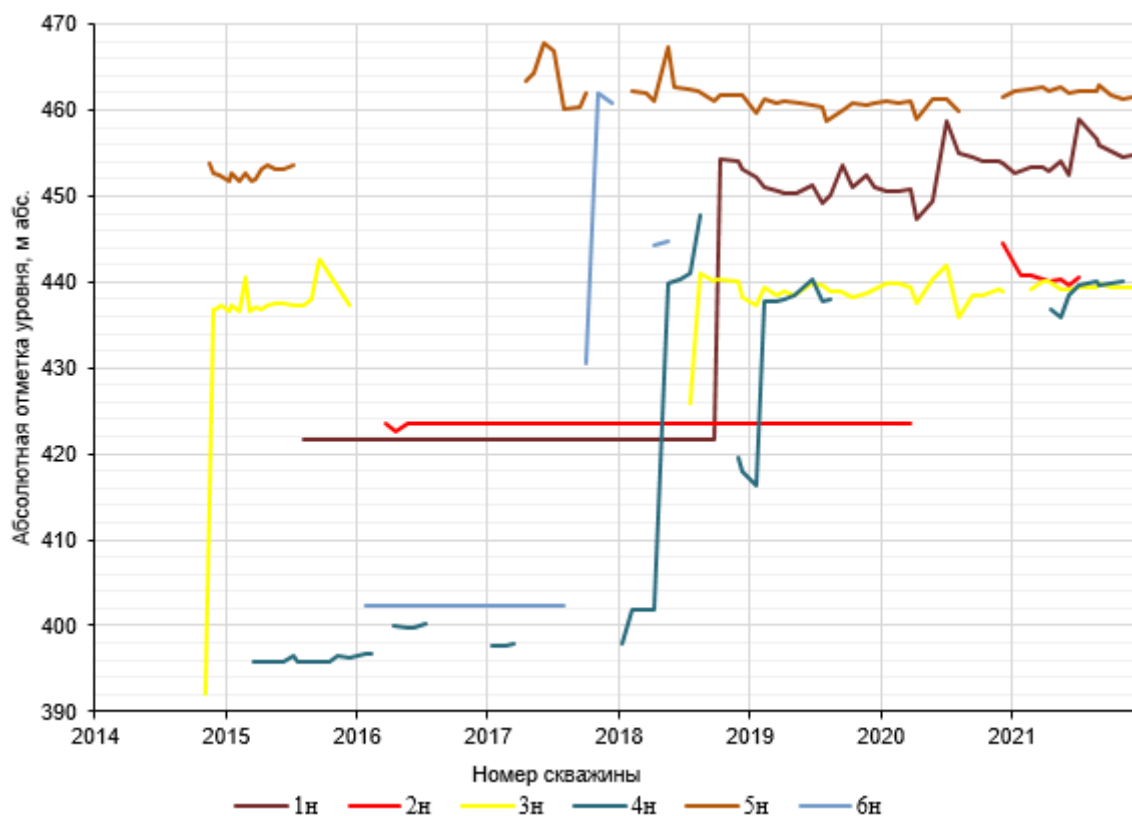


Рис. 6. Изменение уровня подземных вод в техногенном горизонте по данным режимных наблюдений в наблюдательных скважинах
Fig. 6. Groundwater level variations in the technogenic horizon according to the data of monitoring observations in observation wells

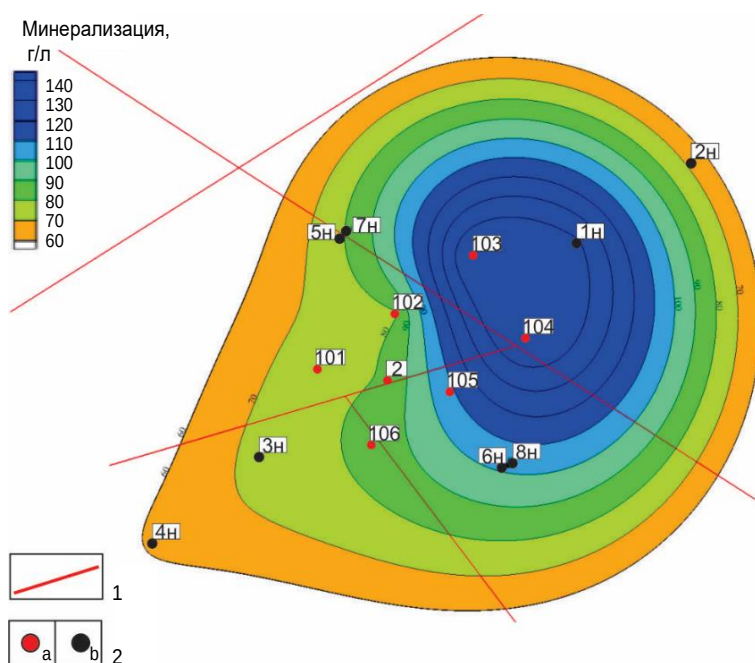


Рис. 7. Изменение минерализации в плане по данным на 2022 г.:
1 – разрывные нарушения;
2 – скважины: а – закачные, б – наблюдательные
Fig. 7. Mineralization variation in the plan according to the data for 2022:
1 – discontinuous faults;
2 – wells: a – injection wells, b – observation wells



Прогнозное моделирование изменения уровня режима техногенного водоносного горизонта в процессе эксплуатации участка «Ноябрьский» было выполнено при следующих условиях:

- граничное условие второго рода в водоупонных скважинах;
- перекрывающая и подстилающая техногенный водоносный горизонт толща многолетнемерзлых пород также задавалась границей второго рода с $Q = 0 \text{ м}^3/\text{ч}$;
- коллекторы толщи многолетнемерзлых пород задавались как «сухой грунт», то есть до начала захоронения рассолов многолетнемерзлых пород не содержали жидкую фазу в трещинно-поровом пространстве; с этой точки зрения процесс захоронения рассолов подобен фильтрации в «сухой грунт» с присущим ему фронтом продвижения границы раздела между «сухим» и насыщенным грунтом [20];
- вертикальный массоперенос в зонах разрывных нарушений (переток закачиваемых рассолов в нижезалегающий нижеордовикский межмерзлотный водоносный комплекс) задавался полупроницаемой границей третьего рода.

Для проведения прогнозных расчетов с определением достаточности емкости участка на весь период эксплуатации месторождения Айхал на модели были заданы следующие условия:

- в качестве начального положения уровней приняты их значения на конец 2021 г.;
- параметры модели приняты на основе решения обратной задачи с учетом изменения их во времени;
- расход закачки дренажных рассолов принят согласно календарному плану отработки месторождения (суммарный расход закачки распределяется равномерно по всем закачным скважинам) (табл. 3).

По результатам прогнозного моделирования построены схемы гидроизопьез в техно-

генном горизонте по состоянию на 2027 г., 2032 г. и на конец отработки месторождения (2044 г.) (рис. 8, 9). Сформирована сложнопостроенная линза, характеризующаяся большим градиентом напора от закачных скважин к периферии участка. На конец моделируемого периода техногенный водоносный горизонт не выходит за пределы горного отвода участка.

Для определения потенциальной полезной емкости на созданной модели были заданы следующие условия:

- в качестве начального положения уровней принимались их значения на конец 2021 г.;
- параметры модели приняты на основе решения обратной задачи с учетом изменения их во времени;
- заданный средний расход закачки дренажных рассолов составил $760 \text{ м}^3/\text{сут.}$;
- суммарный расход закачки распределяется равномерно по всем закачным скважинам.

Критериями исчерпания емкости участка являлись следующие факторы:

- повышение уровня в эпицентре закачки до отметки +583 (глубину 50 м от дневной поверхности);
- площадное распространение техногенного горизонта за пределы горного отвода.

В результате остаточная прогнозная полезная емкость участка «Ноябрьский» на январь 2022 г. была оценена в 6,1 млн м^3 . Если учесть прогнозный объем закачки дренажных вод рудника «Айхал», который в период с 2022 по 2044 гг. составит порядка 3 млн м^3 , можно сделать вывод, что использование участка закачки «Ноябрьский» в объеме не более 157 тыс. м^3 в год с расходом до $430 \text{ м}^3/\text{сут.}$ обеспечивается в полном объеме только емкостными параметрами коллекторов толщи многолетнемерзлых пород без учета перетока закачиваемых рассолов из многолетнемерзлых пород в нижеордовикский межмерзлотный

Таблица 3. Расходы закачки, заданные при моделировании
Table 3. Injection rates specified in simulation

Период времени, гг.	Расход закачки, $\text{м}^3/\text{сут.}$
2022–2029	310
2029–2039	410
2039–2044	430

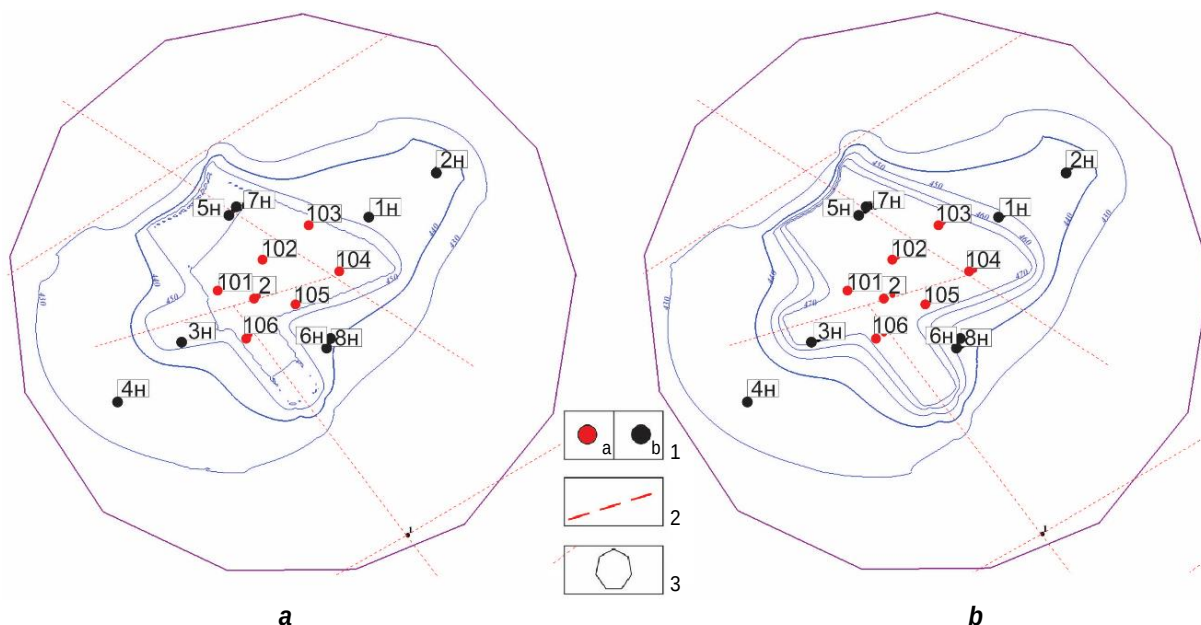


Рис. 8. Прогнозное распределение уровня подземных вод в техногенном горизонте по состоянию на 2027 г. (а) и 2032 г. (б):

1 – скважины: а – закачные, б – наблюдательные; 2 – разрывные нарушения;
3 – горный отвод участка «Ноябрьский»

Fig. 8. Predicted distribution of the groundwater level in the technogenic horizon as of 2027 (a), 2032 (b) year:
1 – wells: a – injection wells, b – observation wells; 2 – faults; 3 – located claim of the Noyabrsky site

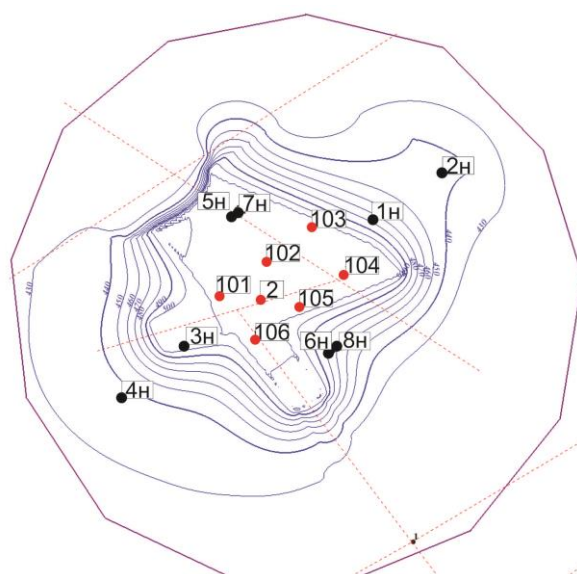


Рис. 9. Прогнозное распределение уровня подземных вод в техногенном горизонте на конец отработки (2044 г.)

Условные обозначения см. на рис. 8

Fig. 9. Predicted distribution of the groundwater level in the technogenic horizon at the end of mining (2044)
See the legend on fig. 8

водоносный комплекс. Формирование вертикального массопереноса из техногенного водоносного горизонта в нижележащий нижнеордовикский межмерзлотный водоносный комплекс произойдет в процессе дальнейшей эксплуатации участков закачки после формирования упругого режима фильтрации.

Заключение

Техногенный водоносный горизонт в пределах участка «Ноябрьский» в настоящее время находится в процессе формирования, так как на данный момент использовано менее 5 % от полезной емкости участка. Тем не менее уже произошло объединение отдельных спо-



радиических линз в единый горизонт, в котором происходят процессы трансформации закачиваемых вод с плановым изменением как минерализации, так и макрокомпонентного состава.

В результате выполненного моделирования можно сделать следующие выводы:

1. Уровень в эпицентре закачки за весь период эксплуатации не превысит экологически безопасных отметок (+581...+583 м абс.). На конец отработки месторождения (2044 г.) по результатам прогнозного моделирования абсолютная отметка уровня в закачных скважинах составит +511 м, что ниже отметки дневной поверхности на 120 м.

2. Площадь растекания дренажных вод в многолетнемерзлых породах не выйдет за пределы границ лицензионного участка до конца отработки месторождения трубы Айхал.

Выполненное прогнозное моделирование подтвердило отсутствие экологических рисков в результате эксплуатации участка как минимум до 2044 г.

Дальнейшая эксплуатация участка закачки

«Ноябрьский» приведет к развитию сформированного техногенного водоносного горизонта, существенно ограниченного по площади. Прогнозная площадь техногенного водоносного горизонта и сопряженных зон вертикального переноса в нижезалегающий нижеордовикский водоносный горизонт составит не более 7 км².

На основе результатов прогнозного моделирования техногенного водоносного горизонта можно сделать вывод, что использование метода закачки дренажных вод рудника «Айхал» в толще многолетнемерзлых пород на участке «Ноябрьский» позволяет уменьшить степень влияния горных и добычных работ на геологическую среду изучаемого района, локализовав ее на планово ограниченном сравнительно небольшом по площади участке. Таким образом, экологически безопасная эксплуатация участка закачки «Ноябрьский», исключающая попадание в поверхностные воды дренажных рассолов, возможна как минимум до 2044 г., то есть до конца добычи на месторождении.

Список источников

1. Гриневский С.О. Гидрогеодинамическое моделирование взаимодействия подземных и поверхностных вод. М.: Инфра-М, 2012. 152 с.
2. Колганов В.Ф., Акишев А.Н., Дроздов А.В. Горно-геологические особенности коренных месторождений алмазов Якутии. Мирный: LAP Lambert Academic Publishing, 2015. 576 с.
3. Климовский И.В., Готовцев С.П. Криолитозона Якутской алмазоносной провинции. Новосибирск: Наука, 1994. 167 с.
4. Янников А.М., Янникова С.А., Овчинникова М.Ю., Корепанов А.Ю. Использование многолетнемерзлых пород для закачки дренажных вод коренных месторождений алмазов на примере участка «Ноябрьский» (рудник «Айхал») // Вестник Пермского университета. Геология. 2021. Т. 20. № 3. С. 284–299. <https://doi.org/10.17072/psu.geol.20.3.284>.
5. Дроздов А.В. Захоронение дренажных рассолов в многолетнемерзлых породах (на примере криолитозоны Сибирской платформы). Иркутск: Изд-во ИрГТУ, 2007. 295 с.
6. Гидрогеология СССР. Т. XX. Якутская АССР / ред. А.И. Ефимов, И.К. Зайцев. М.: Недра, 1970. 384 с.
7. Толстихин О.Н., Шепелев В.В., Никитина Н.М. [и др.]. Мерзлотно-гидрогеологические условия Восточной Сибири / отв. ред. П.И. Мельников. Новосибирск: Наука, 1984. 191 с.
8. Дроздов А.В., Иост Н.А., Лобанов В.В. Криогидрогеология алмазных месторождений Западной Якутии. Иркутск: Изд-во ИрГТУ, 2008. 507 с.
9. Янников А.М. Гидрогеология Алакит-Мархинского кимберлитового поля (Республика Саха (Якутия)). Мирный: Изд-во ЗЯНЦ/ЯНА, 2022. 131 с.
10. Chen M., Izady A., Abdalla O.A. An efficient surrogate-based simulation-optimization method for calibrating a regional MODFLOW model // Journal of Hydrology. 2017. Vol. 544. P. 591–603. <https://doi.org/10.1016/j.jhydrol.2016.12.011>.
11. Hughes J.D., Russcher M.J., Langevin C.D., Morway E.D., McDonald R.R. The MODFLOW application programming interface for simulation control and software interoperability // Environmental Modelling & Software. 2022. Vol. 148. P. 105257. <https://doi.org/10.1016/j.envsoft.2021.105257>.
12. Kelson V. Predicting collector well yields with MODFLOW // Ground Water. 2012. Vol. 50. Iss. 6. P. 918–926. <https://doi.org/10.1111/j.1745-6584.2012.00910.x>.
13. Ameli A.A., Craig J.R. Semi-analytical 3D solution for assessing radial collector well pumping impacts on groundwater-surface water interaction // Hydrology Research. 2017. Vol. 49. Iss. 1. P. 17–26. <https://doi.org/10.2166/nh.2017.201>.
14. Hill M.C., Cooley R.L., Pollock D.W. A controlled experiment in ground water flow model calibration // Groundwater. 1998. Vol. 36. Iss. 3. P. 520–535. <https://doi.org/10.1111/j.1745-6584.1998.tb02824.x>.
15. Акулова В.В., Дроздов А.В., Дроздова Т.И., Худоногова Е.В. Техногенные новообразования как результат взаимодействия мерзлого массива пород и дренажных рассолов. Подземная гидросфера: матери-



алы Всерос. совещ. по подземным водам востока России. Иркутск: Изд-во ИрГТУ, 2006. С. 358–361.

16. Алексеев С.В., Дроздов А.В., Дроздова Т.И., Алексеева Л.П. Первый опыт захоронения соленых дренажных вод карьера трубки Удачная в многолетне-мерзлые породы // Криосфера Земли. 2002. Т. 6. № 2. С. 61–65.

17. Алексеев С.В., Гунин В.И., Дроздов А.В. [и др.]. Особенности миграции высокоминерализованных стоков карьера трубки Удачная в многолетнемерзлых породах при их подземном захоронении // Тезисы докладов III конференции геокриологов России. М.: Изд-во МГУ, 2005. С. 5–12.

18. Янников А.М., Трифонов Н.С., Лепокурова О.Е. Влияние разрывных нарушений на обводнение и газо-

носность глубоких горизонтов трубки «Айхал» (Республика Саха (Якутия)) // Вестник Воронежского государственного университета. Серия: Геология. 2021. № 1. С. 104–113. <https://doi.org/10.17308/geology.2021.1/3342>.

19. Боровская В.А., Гаврилов И.Т., Грабовников В.А., Егоров Н.Н., Ефимова И.В., Зильберштейн Б.М. [и др.]. Гидрогеологические исследования для обоснования подземного захоронения промышленных стоков / ред. В.А. Грабовников. М.: Недра, 1993. 335 с.

20. Дроздов А.В. Оценка перспективности участка «Левобережный» для захоронения дренажных рассолов трубки «Удачной» // Известия Сибирского отделения Секции наук о Земле Российской академии естественных наук. Геология, поиски и разведка рудных месторождений. 2013. № 1. С. 146–156.

References

1. Grinevskii S.O. *Hydrogeodynamic modeling of underground and surface water interaction*. Moscow: Infra-M; 2012. 152 p. (In Russ.).

2. Kolganov V.F., Akishev A.N., Drozdov A.V. *Mining and geological features of primary diamond deposits in Yakutia*. Mirny: LAP Lambert Academic Publishing; 2015. 576 p. (In Russ.).

3. Klimovskii I.V., Gotovtsev S.P. *Cryolithozone of the Yakutsk diamondiferous province*. Novosibirsk: Nauka; 1994. 167 p. (In Russ.).

4. Yannikov A.M., Yannikova S.A., Ovchinnikova M.Yu., Korepanov A.Yu. Using permafrost for pumping drainage water from primary diamond deposits on the example of the Noyabrskiy site (Aykhay mine). *Vestnik Permского университета. Geologiya = Bulletin of Perm University. Geology*. 2021;20(3):284-299. (In Russ.). <https://doi.org/10.17072/psu.geol.20.3.284>.

5. Drozdov A.V. *Drainage brine burial in permafrost (on the example of the permafrost zone of the Siberian Platform)*. Irkutsk: Irkutsk State Technical University; 2007. 295 p. (In Russ.).

6. Efimov A.I., Zaitsev I.K. *Hydrogeology of the USSR. Vol. 20. Yakut ASSR*. Moscow: Nedra; 1970. 384 p. (In Russ.).

7. Tolstikhin O.N., Shepelev V.V., Nikitina N.M., et al. *Permafrost-hydrogeological conditions of Eastern Siberia*. Novosibirsk: Nauka; 1984. 191 p. (In Russ.).

8. Drozdov A.V., Iost N.A., Lobanov V.V. *Cryohydrogeology of diamond deposits in Western Yakutia*. Irkutsk: Irkutsk State Technical University; 2008. 507 p. (In Russ.).

9. Yannikov A.M. *Hydrogeology of the Alakit–Markhin kimberlite field (Republic of Sakha (Yakutiya))*. Mirny: ZYANTS/YANA; 2022. 131 p. (In Russ.).

10. Chen M., Izady A., Abdalla O.A. An efficient surrogate-based simulation-optimization method for calibrating a regional MODFLOW model. *Journal of Hydrology*. 2017;544:591-603. <https://doi.org/10.1016/j.jhydrol.2016.12.011>.

11. Hughes J.D., Russcher M.J., Langevin C.D., Morway E.D., McDonald R.R. The MODFLOW application programming interface for simulation control and software interoperability. *Environmental Modelling & Software*.

2022;148:105257. <https://doi.org/10.1016/j.envsoft.2021.105257>.

12. Kelson V. Predicting collector well yields with MODFLOW. *Ground Water*. 2012; 50(6):918-926. <https://doi.org/10.1111/j.1745-6584.2012.00910.x>.

13. Ameli A.A., Craig J.R. Semi-analytical 3D solution for assessing radial collector well pumping impacts on groundwater-surface water interaction. *Hydrology Research*. 2017;49(1):17-26. <https://doi.org/10.2166/nh.2017.201>.

14. Hill M.C., Cooley R.L., Pollock D.W. A controlled experiment in ground water flow model calibration. *Ground-water*. 1998;36(3):520-535. <https://doi.org/10.1111/j.1745-6584.1998.tb02824.x>.

15. Akulova V.V., Drozdov A.V., Drozdova T.I., Khudonogova E.V. Technogenic neocrystallisations as a result of the frozen rock mass and drainage brine interactions. In: *Podzemnaya gidrosfera: materialy Vseros. soveshch. po podzemnym vodam vostoka Rossii = Underground hydro-sphere: proceedings of All-Russian meeting on underground waters of the Russian East*. Irkutsk: Irkutsk State Technical University; 2006, p. 358–361. (In Russ.).

16. Alekseev S.V., Drozdov A.V., Drozdova T.I., Alekseeva L.P. The first experience of burial of saline drainage waters of Udachnaya pipe quarry into permafrost. *Kriosfera Zemli = Earth's Cryosphere*. 2002;6(2):61-65. (In Russ.).

17. Alekseev S.V., Gunin V.I., Drozdov A.V., et al. Migration features of highly mineralized effluents under the Udachnaya pipe open pit in permafrost under their underground burial. In: *Tezisy докладов III konferentsii geokriologov Rossii = Report abstracts of 3rd conference of Russian geocryologists*. Moscow: Lomonosov Moscow State University; 2005, p. 5–12. (In Russ.).

18. Yannikov A.M., Trifonov N.S., Lepokurova O.E. The impact of faults on the water inflow and gas content of the deep levels of the Aikhal pipe (republic of Sakha (Yakutiya)). *Vestnik Voronezhskogo gosudarstvennogo universiteta. Seriya: Geologiya = Proceedings of Voronezh State University. Series: Geology*. 2021;1:104-113. (In Russ.). <https://doi.org/10.17308/geology.2021.1/3342>.

19. Borevskaya V.A., Gavrilov I.T., Grabovnikov V.A., Egorov N.N., Efimova I.V., Zil'bershtein B.M., et al. *Hydro-*



geological studies to justify the underground disposal of industrial wastewater. Moscow: Nedra; 1993. 335 p. (In Russ.).

20. Drozdov A.V. Evaluation of "Levoberezhny" site perspective for burying drainage brines of pipe "Udachnaya". *Izvestiya Sibirskogo otdeleniya Sektzii nauk*

o Zemle Rossiiskoi akademii estestvennykh nauk. Geologiya, poiski i razvedka rudnykh mestorozhdenii = Proceedings of the Siberian Department of the Section of Earth Sciences of the Russian Academy of Natural Sciences. Geology, Prospecting and Exploration of Ore Deposits. 2013;1:146-156. (In Russ.).

Информация об авторах / Information about the authors



Янников Алексей Михайлович,
кандидат геолого-минералогических наук,
заместитель директора по научной работе,
Институт «Якутнипроалмаз» АК «АЛРОСА» (ПАО),
г. Мирный, Россия,
✉ yannikov90@mail.ru
<http://orcid.org/0000-0002-2169-123X>
Aleksey M. Yannikov,
Cand. Sci. (Geol. & Mineral.),
Deputy Director for Research,
"Yakutniproalmaz" Institute, PJSC "ALROSA",
Mirny, Russia,
✉ yannikov90@mail.ru
<http://orcid.org/0000-0002-2169-123X>



Стручкова Агита Сергеевна,
заведующая сектором гидрогеологического
и гидродинамического моделирования,
Институт «Якутнипроалмаз» АК «АЛРОСА» (ПАО),
г. Мирный, Россия,
StruchkovaAS@alrosa.ru
<https://orcid.org/0000-0001-7835-6048>
Agita S. Struchkova,
Head of the Sector of Hydrogeological and Hydrodynamic Modeling,
"Yakutniproalmaz" Institute, PJSC "ALROSA",
Mirny, Russia,
StruchkovaAS@alrosa.ru
<https://orcid.org/0000-0001-7835-6048>



Корепанов Алексей Юрьевич,
заведующий Лабораторией горно-геологических
проблем разработки месторождений,
Институт «Якутнипроалмаз» АК «АЛРОСА» (ПАО),
г. Мирный, Россия,
KorepanovAYu@alrosa.ru
<https://orcid.org/0000-0002-3593-2524>
Aleksey Yu. Korepanov,
Head of the Laboratory of Mining and Geological
Problems of Field Development,
"Yakutniproalmaz" Institute, PJSC "ALROSA",
Mirny, Russia,
KorepanovAYu@alrosa.ru
<https://orcid.org/0000-0002-3593-2524>

Вклад авторов / Contribution of the authors

Все авторы сделали эквивалентный вклад в подготовку публикации.
The authors contributed equally to this article.



Конфликт интересов / Conflict of interests

Авторы заявляют об отсутствии конфликта интересов.
The authors declare no conflicts of interests.

Все авторы прочитали и одобрили окончательный вариант рукописи.
The final manuscript has been read and approved by all the co-authors.

Информация о статье / Information about the article

Статья поступила в редакцию 13.01.2023; одобрена после рецензирования 06.02.2023; принята к публикации 24.02.2023.

The article was submitted 13.01.2023; approved after reviewing 06.02.2023; accepted for publication 24.02.2023.

ГЕОЛОГИЯ, ПОИСКИ И РАЗВЕДКА ТВЕРДЫХ
ПОЛЕЗНЫХ ИСКОПАЕМЫХ, МИНЕРАГЕНИЯ

Научная статья

УДК 552.13

<https://doi.org/10.21285/2686-9993-2023-46-1-36-50>Состав руд и характеристика самородного золота
одного из рудопроявлений Восточного ЗабайкальяТ.С. Никанюк^{а,в}^аАО «ИРГИРЕДМЕТ», г. Иркутск, Россия^вИнститут геохимии им. А.П. Виноградова СО РАН, г. Иркутск, Россия

Резюме. Статья посвящена характеристике руд одного из рудопроявлений Мунгинского узла, расположенного на западном фланге одного из промышленных месторождений Восточного Забайкалья. Руды данного перспективного рудопроявления изучены слабо, особенно в технологическом плане, что и послужило основанием для проведения исследования их состава и характеристики их главного полезного компонента – самородного золота. Исследование состава руд и измененных пород проводилось методами атомно-эмиссионного спектрального количественного анализа, рентгенофлуоресцентного, а также фазового атомно-абсорбционного анализов и атомно-эмиссионного анализа с индуктивно связанной плазмой ICP-AES. Массовая доля общего и органического углерода определялась в Центральной пробирно-аналитической лаборатории АО «Покровский рудник» г. Благовещенска. Доля карбонатного диоксида углерода устанавливалась по методике «Титриметрическое определение диоксида углерода». Содержание золота приводилось по данным пробирной плавки, серебра – по данным атомно-абсорбционного анализа. Петрографические и минераграфические исследования осуществлялись на оптическом микроскопе Olympus BX-51. Минеральный состав пробы руды также оценивался по результатам рентгеноструктурного (дифрактометрического) анализа. Количественный минеральный состав изучался на дробленном материале исходной руды крупностью -2 мм с использованием данных микроскопических исследований прозрачных и полированных шлифов на микроскопе Nikon Eclipse LV 100 POL. Содержание гидроксидов железа определялось по разнице в весе после обработки пробы 10 %-м раствором щавелевой кислоты на водяной бане. Сравнивая полученные результаты по рудопроявлению с материалами по составу руд ближайшего месторождения, расположенного в 30 км, можно отметить, с одной стороны, их близость и однотипность, а с другой – некоторые отличия. Общими параметрами является довольно высокая степень сульфидности руд и их сходный химический и минеральный состав с преобладанием арсенопирита и повышенной ролью висмута, преобладание мелкого золота и его сходные морфологические характеристики. Данный факт позволяет рассматривать исследуемое рудопроявление восточного Забайкалья как составную часть единой рудной системы ближайшего месторождения.

Ключевые слова: Восточное Забайкалье, Бaleyский рудный район, эпитеpмальное и мезотермальное месторождения, рудопроявление, химический и минеральный состав, пробы золота

Для цитирования: Никанюк Т.С. Состав руд и характеристика самородного золота одного из рудопроявлений Восточного Забайкалья // Науки о Земле и недропользование. 2023. Т. 46. № 1. С. 36–50. <https://doi.org/10.21285/2686-9993-2023-46-1-36-50>.

GEOLOGY, PROSPECTING AND EXPLORATION
OF SOLID MINERALS, MINERAGENY

Original article

Ore composition and native gold characteristics
of an ore occurrence in Eastern TransbaikaliaTatiana S. Nikanyuk^{a,v}^aJSC IRGIREDMET, Irkutsk, Russia^vVinogradov Institute of Geochemistry SB RAS, Irkutsk, Russia

© Никанюк Т.С., 2023



Abstract. The article deals with the characteristics of the ores of an ore occurrence of the Munginsky cluster located on the western flank of one of the commercial fields of Eastern Transbaikalia. The ores of this promising ore occurrence are underexplored, especially in the technological aspect, which served the basis for studying their composition and characterizing native gold as their main commercial component. The composition of ores and altered rocks was studied by the following methods: atomic emission spectral quantitative analysis, X-ray fluorescence, as well as phase atomic absorption and atomic emission analysis with inductively coupled plasma ICP-AES. The mass fraction of total and organic carbon was determined in the Central Fire Assay Laboratory of JSC Pokrovsky Rudnik, Blagoveshchensk. The proportion of carbonate carbon dioxide was determined by the method of titrimetric determination of carbon dioxide. The content of gold was given according to the data of assay melting, the content of silver – according to the data of atomic absorption analysis. Petrographic and mineragraphic studies were carried out using an optical microscope Olympus BX-51. The mineral composition of the ore sample was also estimated based on the results of X-ray diffraction analysis. The quantitative mineral composition was studied on the crushed material of the original ore with a particle size of -2 mm using the microscopic study data of transparent and polished thin sections on a microscope Nikon Eclipse LV 100 POL. The content of iron hydroxides was determined from the weight difference after the sample was treated with a 10 % oxalic acid solution in a water bath. Comparison of the results obtained on the ore occurrence with the materials on the ore composition of the closest deposit located in 30 km demonstrates that on the one hand they are similar and uniform, and on the other hand they feature some differences. Their common parameters include a rather high degree of sulfide content of ores and similar chemical and mineral composition with the predominance of arsenopyrite, an increased role of bismuth as well as the predominance of fine gold and its similar morphological characteristics. This fact allows to consider the ore occurrence under investigation as an integral part of a single ore system of the closest deposit.

Keywords: Eastern Transbaikalia, Balei ore region, epithermal and mesothermal deposits, ore occurrence, chemical and mineral composition, fineness of gold

For citation: Nikanyuk T.S. Ore composition and native gold characteristics of an ore occurrence in Eastern Transbaikalia. *Nauki o Zemle i nedropol'zovanie = Earth sciences and subsoil use*. 2023;46(1):36-50. (In Russ.). <https://doi.org/10.21285/2686-9993-2023-46-1-36-50>.

Введение

Рассматриваемое в ходе проведенного исследования рудопроявление входит в состав Мунгинского рудного узла одного из месторождений Восточного Забайкалья, которое расположено на юго-восточном фланге Балейского рудного района (рис. 1), где известны золоторудные мезотермальные месторождения Сосновское, Майское, Средне-Голготайское и Казаковское, а также крупнейшее эпитеермальное месторождение региона Балейское [1–5].

Мунгинский рудный узел Балейского рудного района, включающий золоторудное месторождение и рудопроявления (рис. 1 и 2), расположен в нескольких десятках километров восточнее г. Балей. Эти объекты относятся к месторождениям золото-кварц-сульфидного типа [6–11]. В геологическом строении Мунгинского рудного узла (см. рис. 1 и 2) принимают участие палеозойские осадочные отложения, мезозойские вулканогенно-осадочные образования, интрузивные образования позднепалеозойского ундинского и среднепозднеюрского шахтаминского комплексов [12–15]. В его составе главным является одно из промышленных месторождений Восточного Забайкалья, образование которого свя-

зывается с процессами формирования позднеюрской кольцевой вулканоплутонической структуры [16–18]. На месторождении известны три рудоносные зоны: Западная, Широтная и Восточная, протяженность которых достигает 1 км при мощности от 0,2 до 11 м. Простираение зон субширотное, северо-западное или северо-восточное с крутым падением на юг, северо-запад или юго-восток. На западном фланге месторождения известна серия рудопроявлений (Рябоконь, Ново-Мунгинское и Глазковское), которые ранее были отнесены к Ново-Мунгинскому объекту (см. рис. 1) [19–21]. Одним из перспективных участков этого рудопроявления является жильная система (рис. 3), которая представляет собой протяженное до 200 м рудное тело арсенопирит-пирит-турмалин-кварцевого состава северо-восточного простираения с продуктивной частью около 160 м, локализованное в гранитах третьей фазы ундинского комплекса, рассеянных дайками позднемезозойских порфириров. Мощность рудного тела составляет 15 м, оно сопровождается ареалом метасоматитов серицит-кварцевого состава, ширина выхода которого варьирует от 2 до 25 м. По данным бурения промышленное оруденение прослежено на глубину до 100 м. В строении рудного



тела выделяются три морфологически различные части: юго-западный фланг в виде стволной жилы с зоной прожилково-вкрапленной минерализации; центральная, самая продук-

тивная часть, представляющая собой систему субпараллельных жил линзовидной формы; апофизы от центральной жилы, формирующие линейную штокверкоподобную зону протяжен-

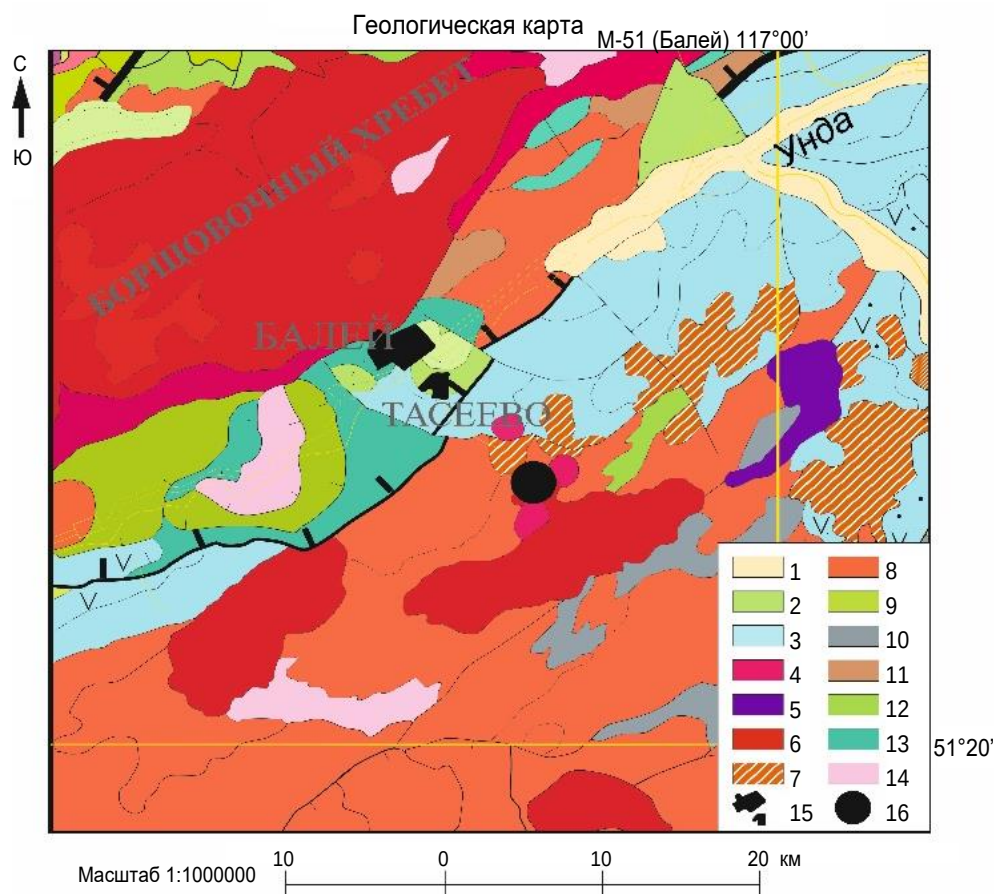


Рис. 1. Геологическая позиция рудопроявления в региональном масштабе Мунгинского рудного узла¹:
1–5: средне-позднеюрские отложения: 1 – ундино-даинский, нерчинский, шадаронский, приаргунский, мулинский вулканические комплексы, 2 – субвулканические образования шадаронской, приаргунской, мулинской серий, тела и дайки, 3 – шахтаминский комплекс монцодиорит-гранодиорит-гранитовый, 4 – борщовочный комплекс гранитовый, 5 – акатуйский комплекс монзонит-сиенитовый; 6 – отложения раннего карбона: ямкунская серия; 7 – отложения раннего девона: лохковский ярус, макаровская толща; 8 – отложения ранней перми: ундинский комплекс гранит-гранодиоритовый; 9, 10 – ранний протерозой: 9 – чонгульский комплекс габбровый, 10 – ишагинский комплекс метаморфический; 11 – средний палеозой: агинско-борщовочный комплекс динамометаморфический, зеленосланцевый подкомплекс, филлонитовый подкомплекс; 12 – ранний мел: тургинская свита; 13 – квартал, голоцен: аллювиальные отложения пойм; 14 – ранний протерозой: урульгинский комплекс метаморфический; 15 – контуры населенных пунктов; 16 – месторождение Верхне-Алиинское

Fig. 1. Geological position of the ore occurrence on a regional scale of the Munginsky ore cluster¹:
1–5: Middle-Late Jurassic deposits: 1 – Unda-Dainsky, Nerchinsky, Shadaron, Argun, Mulinsky volcanic complexes, 2 – subvolcanic formations of the Shadaron, Argun, Mulinsky body and dike series, 3 – Shakhtama monzodiorite-granodiorite-granite complex, 4 – Borchshovochnyi granite complex, 5 – Akatui monzonite-syenite complex; 6 – Early Carboniferous deposits: Yamkunskaia series; 7 – Early Devonian deposits: Lokhkovsky stage, Makarovskaya strata; 8 – Early Permian deposits: Unda granite-granodiorite complex; 9, 10 – Early Proterozoic: 9 – Chongulsky gabbro complex, 10 – Ishaginsky metamorphic complex; 11 – Middle Paleozoic: dynamo-metamorphic Aginsky-Borchshovochnyi complex, greenschist subcomplex, phyllonite subcomplex; 12 – Early Cretaceous: Turga formation; 13 – Quaternary, Holocene: alluvial deposits of floodplains; 14 – Early Proterozoic: Uruleginsky complex metamorphic; 15 – contours of settlements; 16 – Verkhne-Aliinskoe deposit

¹ Составлено на основе Государственной геологической карты Российской Федерации масштаба 1:1000000 (третье поколение). Алдано-Забайкальская серия. Геологическая карта. Л. М-51.

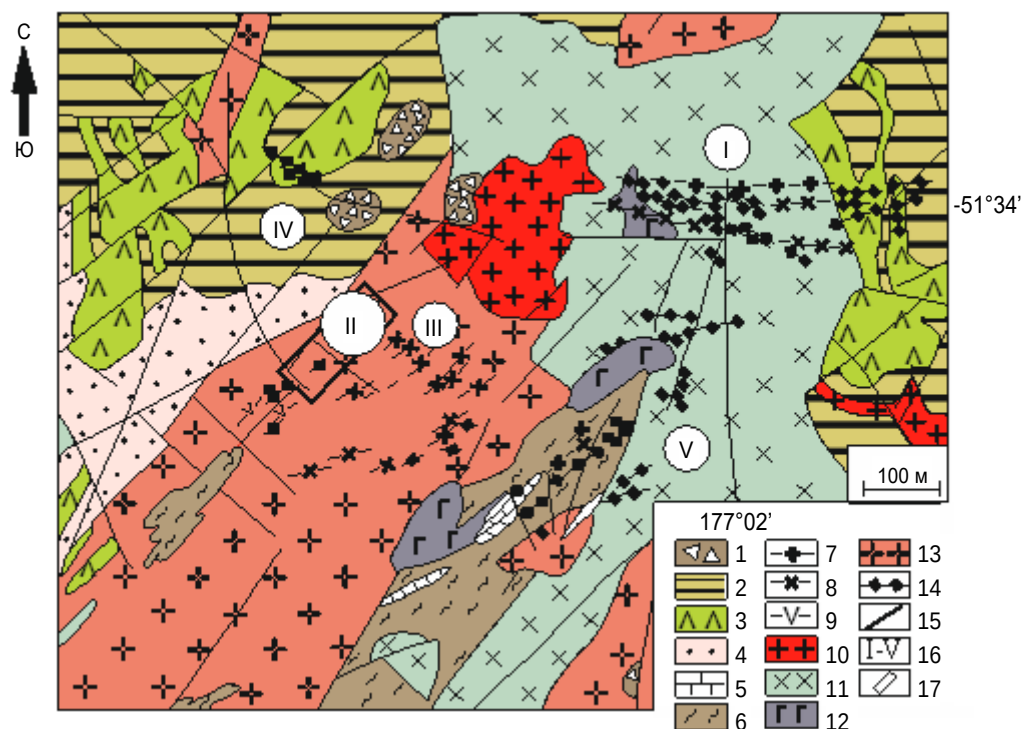


Рис. 2. Локальная позиция на западном фланге одного из месторождений Восточного Забайкалья:
1 – (J_3) флюидно-эксплозивные брекчии; 2 – (J_{2-3}) вулканогенные отложения шадаронской серии: андезиты, андезито-базальты, андезито-дациты, трахидациты, брекчии, лавы, туфы, туфопесчаники, туфоконгломераты, гравелиты, дресвяники; 3 – (J_{2-3}) эффузивы шадаронской серии: андезито-базальты, андезиты, дациты; 4 – (J_2) осадочные отложения верхнегазимульской свиты: конгломераты, дресвяники, песчаники, алевролиты, туфы кислого состава; 5, 6 – (C_1) осадочные отложения верхнегазимульской свиты: 5 – мраморизованные известняки, 6 – кристаллические сланцы, амфиболиты, гнейсы; 7–9 – (J_{2-3}) шахтаминский комплекс: 7 – дайки гранит-порфиров, 8 – дайки диоритовых порфиров, 9 – дайки лампрофиров; 10 – гранит-порфиры; 11 – монзониты, сиениты; 12 – габбро, перидотиты; 13 – гранитоиды ундинского комплекса (C); 14 – золотоносные кварцево-сульфидные жилы; 15 – тектонические нарушения; 16 – Верхне-Алиинское месторождение (I) и рудопоявления Рябоконт (II), Ново-Мунгинское (III), Мунгинское (IV), Глазкинское (V); 17 – контур жилы Рябоконт

Fig. 2. Local position on the western flank of one of the Eastern Transbaikalian fields
1 – (J_3) fluid-explosive breccias; 2 – (J_{2-3}) volcanogenic deposits of the Shadaron series: andesites, andesite-basalts, andesite-dacites, trachydacites, breccias, lavas, tuffs, tuff sandstones, tuff-conglomerates, gravelite, gruss; 3 – (J_{2-3}) effusives of the Shadaron series: andesite-basalts, andesites, dacites; 4 – (J_2) sedimentary deposits of the Upper Gazimur formation: conglomerates, gruss, sandstones, siltstones, felsic tuffs; 5, 6 – (C_1) sedimentary deposits of the Upper Gazimur formation: 5 – marbled limestones, 6 – crystalline schists, amphibolites, gneisses; 7–9 – (J_{2-3}) Shakhtaminsky complex: 7 – granite-porphyry dikes, 8 – dioritic porphyrite dikes, 9 – lamprophyre dikes; 10 – granite-porphyry; 11 – monzonites, syenites; 12 – gabbro, peridotites; 13 – Unda complex granitoids (C); 14 – gold-bearing quartz-sulfide veins; 15 – tectonic disturbances; 16 – Verkhne-Aliinskoye deposit (I) and Ryabokon ore occurrence (II), Novo-Munginskoye ore occurrence (III), Munginskoye ore occurrence (IV), Glazkinskoye ore occurrence (V); 17 – contour of the Ryabokon vein

ностью до 150 м. Северо-восточный фланг представлен двумя субпараллельными жилами с невысокой продуктивностью.

Материалы и методы исследования

Материалом для данного исследования послужила малая технологическая проба весом 87 кг, отобранная из центральной части рудного тела в сечении 19 траншеи 50 (см. рис. 3) и представляющая собой кварц-турма-

лин-арсенопирит-пирротиную жилу, локализованную в турмалинизированных гранодиоритах, содержащих маломощные кварц-сульфидные прожилки. Содержание золота составляет 10,79 г/т, серебра – 59,24 г/т. Кроме того, был исследован ряд образцов, отобранных из других частей рудного тела.

Исследование состава руд и измененных пород проводилось методами атомно-эмиссионного спектрального количественного анализа (АО «Сосновгео») и рентгенофлуоресцентного

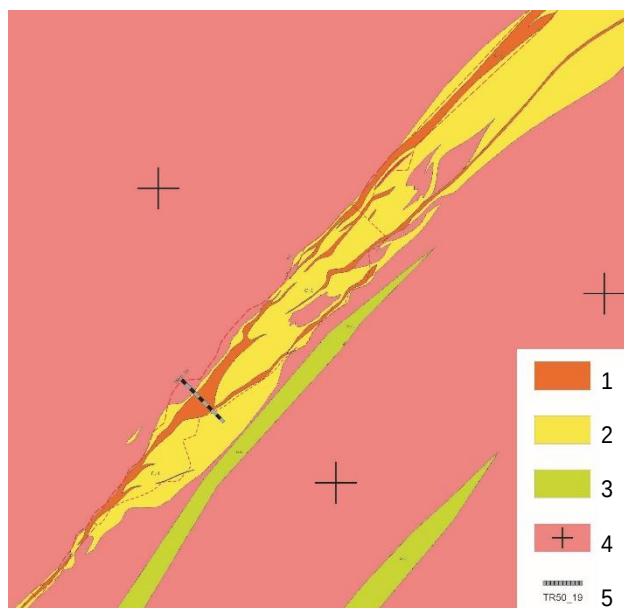


Рис. 3. Геологическая карта рудопроявления:

1 – кварц-турмалиновые сульфидные жилы и прожилки; 2 – метасоматиты серицит-кварцевого состава; 3 – дайки диоритовых порфиров; 4 – граниты ундинского комплекса; 5 – сечение траншеи TR50-19

Fig. 3. Geological map of ore occurrence:

1 – quartz-tourmaline sulfide veins and veinlets; 2 – sericite-quartz metasomatites; 3 – diorite porphyry dikes; 4 – granites of the Unda complex; 5 – section of the TR50-19 trench

анализа (АО «Иргиредмет», методика Испытательного аналитического центра МА ИАЦ-53-2004²), а также фазового атомно-абсорбционного и атомно-эмиссионного с индуктивно связанной плазмой ICP-AES анализов руд (АО «Иргиредмет», МА ИАЦ-70-2010³). Массовая доля общего и органического углерода определялась в Центральной пробирно-аналитической лаборатории АО «Покровский рудник» г. Благовещенска. Методика выполнения измерений велась согласно инструкции Всероссийского научно-исследовательского института минерального сырья им. Н.М. Федоровского НСАМ № 446-Х⁴, средством измерений служил анализатор серы и углерода LecoSC-114 DR. Доля карбонатного диоксида углерода устанавливалась по методике Всероссийского научно-исследовательского ин-

ститута минерального сырья им. Н.М. Федоровского «Титриметрическое определение диоксида углерода»⁵. Содержание золота приводилось по данным пробирной плавки, серебра – по данным атомно-абсорбционного анализа (АО «Иргиредмет», МА ИАЦ-44/01.00057/2012⁶).

Петрографические и минераграфические исследования проводились на оптическом микроскопе Olympus BX-51. Минеральный состав пробы руды также оценивался по результатам рентгеноструктурного (дифрактометрического) метода⁷. Количественный минеральный состав изучался на дробленном материале исходной руды крупностью -2 мм с использованием данных микроскопических исследований прозрачных и полированных шлифов на микроскопе Nikon Eclipse LV 100 POL.

² МА ИАЦ-53-2004 (ФР.1.31.2014.18483) КХА. Методика измерений массовых долей элементов: Na, Mg, Al, Si, P, S, Ca, K, Ti, Mn, Fe, Cu, Zn, As, Pb, Sb, Ni, Cr, Co, Cd, Sn, Mo, Nb, Ta, Zr, Y, Sr, Rb, U, Th, Bi, Hg, W, V, Ba, La и Ce в пробах руд золотосодержащих и продуктов их переработки рентгенофлуоресцентным методом.

³ МА ИАЦ-70-2010 (ФР.1.31.2010.07431). Методика определения массовых долей элементов в рудах и продуктах их переработки атомно-эмиссионным методом с индуктивно связанной плазмой.

⁴ НСАМ 446-Х. Определение углерода органических соединений методом сжигания в токе кислорода: инструкция. М.: Изд-во ВИМС, 1997. 11 с.

⁵ Титриметрическое определение диоксида углерода: методика III категории. М.: Изд-во ВИМС, 1986. 7 с.

⁶ МА ИАЦ-44/01.00057/2012 (ФР.1.31.2014.18470). Методика измерений массовых долей серебра в пробах руд и продуктов их переработки атомно-абсорбционным методом.

⁷ Методы минералогических исследований: справочник / ред. А.И. Гинзбург. М.: Недра, 1985. 480 с.



Содержание гидроксидов железа определялось по разнице в весе после обработки пробы 10 %-м раствором щавелевой кислоты на водяной бане.

Описание форм нахождения рудных минералов и их ассоциаций в пробе руды проводилось на основании изучения гравеоцентриков, брикетных и полированных шлифов. Составы минералов изучались с помощью электронно-зондового микроанализа на приборах Camebax SX-50 (Аналитический центр Института геохимии им. А.П. Виноградова СО РАН) и TesCan (АО «Иргиредмет»).

Результаты исследования

Химический состав руды. Из данных химического анализа (табл. 1) видно, что проба на 69,3 % состоит из оксида кремния. В пределах 1 % отмечается бор. Содержание редких и рассеянных элементов в пробе руды не превышает сотые и тысячные доли процента. Рудные компоненты представлены главным образом железом, мышьяком и серой. Содержание других цветных металлов не превышает сотых и тысячных долей процента.

Проба руды характеризует смешанный тип руд⁸, так как степень окисления, рассчитанная по железу, находится на уровне 51 %.

Основным полезным компонентом в пробе руды является золото, его содержание составляет 10,3 г/т. Серебро с содержанием

51,1 г/т относится к попутно извлекаемому компоненту.

Минеральный состав руд и метасоматитов. По данным петрографического и минералогического изучения руд и по результатам рентгеноструктурного анализа определено, что основными минералами, составляющими пробу руды, являются (в порядке убывания количества): кварц, скородит, турмалин, арсенипирит, слюда (мусковит, серицит) и пирит – 2 %, кроме того, присутствуют халькопирит, единичные зерна пирротина, галенита, минералов висмута, ковеллин и ряд гидроксидов железа. Результаты количественного минерального состава приведены с учетом данных химического и рентгеноструктурного анализов и отображены в табл. 2. По количеству сульфидов проба руды относится к умеренносульфидному типу руд⁹. Вторичные минералы представлены практически на 89 % скородитом и на 11 % гидроксидами железа.

Описание минералов. Исследование прозрачных шлифов показало, что порода состоит в основном из кварца, турмалина и слюды. Микротекстура неоднородная, пятнистая, прожилковая; микроструктура разнотекстурированная, лепидогранобластовая, нематолепидобластовая, гранобластовая (рис. 4).

Кварц в шлифе представлен агрегатами от мелких до средних размеров. Мелкие агрегаты с ровными границами по отношению к другим

Таблица 1. Химический состав пробы руды
Table 1. Chemical composition of the ore sample

Компонент	Массовая доля, %	Компонент	Массовая доля, %	Компонент	Массовая доля, %	Компонент	Массовая доля, %
SiO ₂	69,3	Fe _{сульф.}	3,5	B	1	Ba	0,008
Al ₂ O ₃	7,2	S _{общ.}	2,65	Bi	0,036	Sr	0,0068
TiO ₂	0,19	So _{кисл.}	< 0,2	Co	0,0027	Te	0,0013
CaO	0,14	S _{сульф.}	2,63	Cr	0,0161	V	0,0013
K ₂ O	1,19	AS _{общ.}	6,66	Hg	< 0,0005	W	< 0,0005
Na ₂ O	0,25	AS _{кисл.}	3,52	La	0,0031	Y	0,0005
MgO	0,48	AS _{сульф.}	3,14	Mo	< 0,0002	Zr	0,0038
MnO	0,026	Cu	0,046	Ni	0,0018	CO _{2карб.}	0,2
P ₂ O ₅	0,082	Pb	0,038	Sc	< 0,0003	C _{орг.}	< 0,05
Fe _{общ.}	8,21	Sb	0,013	Se	< 0,0005	Ag	51,1 г/т
Fe _{окисл.}	4,71	Zn	0,0058	Sn	0,0038	Au	10,3 г/т

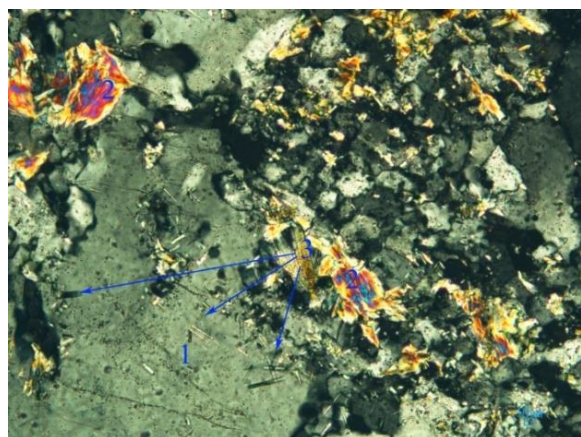
⁸ Лодейщиков В.В., Васильева А.В. Методические рекомендации по типизации руд, технологическому опробованию и картированию коренных месторождений золота. Иркутск: Изд-во ОАО «Иргиредмет», 1997. 164 с.

⁹ Там же.

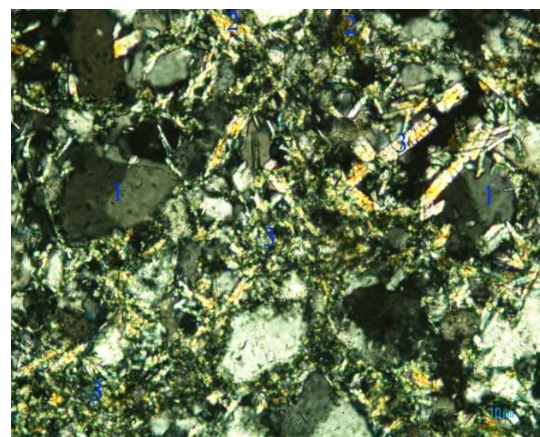


Таблица 2. Минеральный состав пробы руды
Table 2. Mineral composition of the ore sample

Минерал, группа минералов	Массовая доля, %
Жильные и метасоматические:	78,1
Кварц	63,6
Турмалин (шерл)	8
Слюда (мусковит, серицит)	6
Карбонаты	0,5
Рудные сульфиды:	9,3
Арсенопирит	6,8
Пирит (марказит)	2,4
Пирротин, галенит, висмутин, галеновисмутин	Единичные зерна
Халькопирит, ковеллин	0,1
Минералы зоны окисления:	12,6
Скородит	11
Гидроксиды железа (лимонит, гетит, гидрогетит)	1,6
Акцессорные (апатит, рутил, хлорит)	Редкие и единичные знаки
Итого	100



а



b

Рис. 4. Метасоматиты пятнистой (а), неоднородной (b) микротекстуры, состоящие из выделений разномасштабного кварца (1), слюды (2) и турмалина (3)
Структура: разномасштабная, лепидогранобластная. Прозрачные шлифы. Поляризатор X
Fig. 4. Metasomatites of spotted (a), heterogeneous (b) microtexture consisting of segregations of inequigranular quartz (1), mica (2), and tourmaline (3)
Structure: inequigranular, lepidogranoblastic. Clear sections. Polarizer X

минералам при скрещенных поляризаторах образуют мозаику из зерен с равномерным прямым погасанием. Средние по размеру агрегаты – с неровными раковистыми границами, с облачным и облачно-волнистым, местами блочным погасанием. На отдельных участках наблюдается мелкозернистый кварц в межзерновом пространстве агрегатов кварца большего размера и рудных минералов. Размер зерен – от 0,07 до 1,3 мм.

Турмалин представлен полиморфной разновидностью шерла в ассоциации с силикатами в виде призматических и игольчатых

выделений, которые отмечаются отдельными зернами или их мономинеральным агрегатом, а также в тесном срастании с кварцем и слюдой. Размер зерен турмалина изменяется от 0,05 до 0,5 мм с преобладанием размера от 0,01 до 0,1 мм по длинной оси. Мощность скоплений – до 1 мм.

Слюда представлена чешуйками мусковита и серицита, которые заполняют интерстиционное пространство и отмечаются в ассоциации с турмалином. Размерность чешуек – от десятых до сотых долей миллиметра. По данным петрографического анализа,

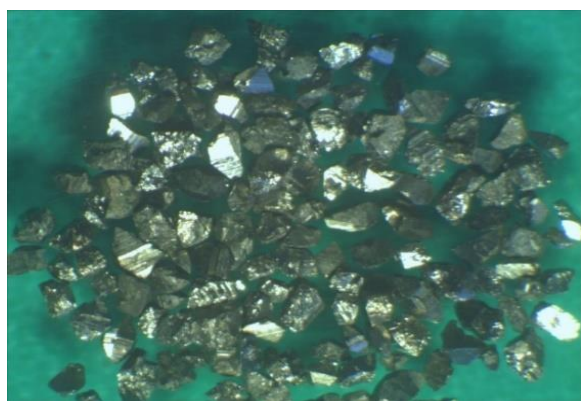


это в основном серицит (75 %), в меньшей степени мусковит (25 %).

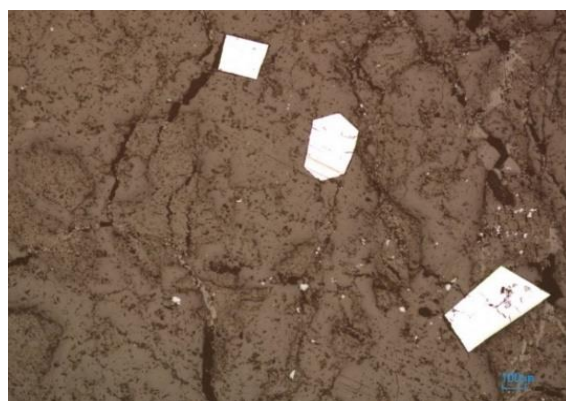
При изучении полированных шлифов установлено, что руды жилы Рябоконь представляют собой существенно сульфидный агрегат с небольшими (25 %) участками жильного кварц-турмалинового материала. Иногда это существенно кварц-турмалиновый агрегат, в нем присутствуют просечки (1–2 мм) и изометричные скопления сульфидов (3 %), а также небольшие (до 5 мм) изометричные пластинки, тонкоигольчатые выделения сульфидов (3–5 %), цементирующие кварцевые обломки. Сульфидная минерализация состоит в основном из агрегата арсенопирита в парогенных сростаниях с кварцем, агрегатов позднего пирита и единичных зерен халькопирита. Последние два сульфида явно секут и цементируют арсенопирит и кварц. Арсенопирита количественно больше, чем пирита, но местами это интерстициальный агрегат пирита с халькопиритом в соседстве с идиоморфными гнездами и вкрапленностью арсенопирита. Арсенопирит отмечается в виде ромбических, шестоватых выделений и мелких агрегатов сферолитоподобных звездочек. Зафиксированы просечки халькопирита, секущие силикаты и корродирующие арсенопирит. Иногда халькопирит встречается в виде микровключений в центре арсенопирита. Нередки находки интерстициально-прожилкового пирита в брекчиевидном агрегате с переходами

от микрокристаллического марказитоподобного к хорошо раскристаллизованному (в крупных выделениях) к центральной их части. Марказит отмечается в виде ажурных цепочек и мохнатых выделений. В позднем пирите зафиксированы микровключения пирротина. Данные микроскопического исследования позволяют выделить две ассоциации минералов: раннюю арсенопирит-кварцевую и позднюю пирит-халькопирит-турмалиновую, причем в последней отмечены реликты раннего пирротина, затем марказит с переходом в пирит. Ко всему прочему, прожилки пирита в арсенопирите несут в себе реликты колломорфности.

Далее рассмотрим характеристику основных выявленных минералов руд. Арсенопирит представлен в основном ромбическими, реже призматическими зернами, их обломками и тонкозернистыми агрегатами (рис. 5). Размер зерен изменяется от 0,5 до 0,01 мм с преобладанием зерен в интервале от 0,25 и 0,07 мм. Микроскопические исследования показали, что арсенопирит интенсивно катаклазирован и в нем в виде прожилков, гнезд развиваются более поздние гипидиоморфнозернистый пирит, халькопирит и микровключения галено-висмутита (рис. 6). Зерна арсенопирита в различной степени замещены скородитом. Степень окисления зерен сульфида мышьяка разная: от тонких прерывистых корковых покрытий до практически полных псевдоморфоз.



a



b

Рис. 5. Арсенопирит:

- a – выборка фракции сульфидов арсенопирита из гравикоцентра (увеличение 22^х);
b – форма и характер вкрапленной минерализации арсенопирита*
Полированный шлиф. Поляризатор ||

Fig. 5. Arsenopyrite:

- a – sampling of the arsenopyrite sulfide fraction from the gravity concentrate (22^x magnification);
b – shape and nature of disseminated arsenopyrite mineralization*
Polished thin section. Polarizer ||

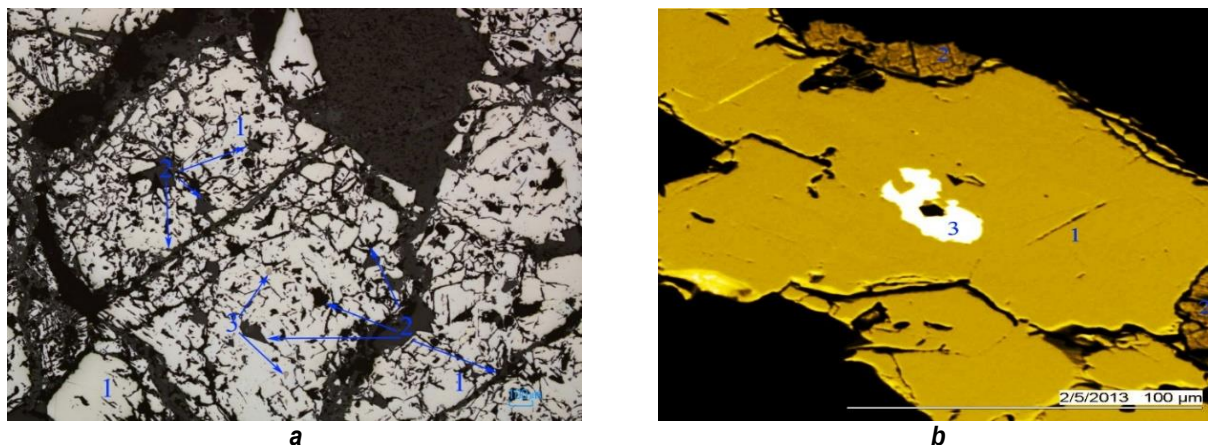


Рис. 6. Морфология и ассоциация арсенопирита:

a – крупные катаклазированные зерна арсенопирита (1) замещаются по краям зерен и микротрещинам скородитом (2), включения халькопирита (3) в арсенопирите
Полированный шлиф. Поляризатор ||

b – арсенопирит (1) в сростках с халькопиритом (2) и с микровключением галеновисмутитина (3), в халькопирите и галеновисмутитине отмечается примесь серебра
Микроанализатор Camebax SX-50. Снимок в обратнорассеянных электронах. Брикетный шлиф

Fig. 6. Arsenopyrite morphology and association:

a – large cataclastic arsenopyrite grains (1) replaced by scorodite along the grain edges and microcracks (2), chalcopyrite inclusions (3) in arsenopyrite
Polished section. Polarizer ||

b – arsenopyrite (1) aggregated with chalcopyrite (2) and with microinclusions of galenobismuthine (3), there is an admixture of silver in chalcopyrite and galenobismuthine
Camebax SX-50 microanalyzer. Snapshot is made in back-scattered electrons. Briquette thin section

Выделения пирита (марказита) в дробленой руде представляют собой кристаллики кубической и удлиненной формы, их обломки и тонкозернистые агрегаты. Размер зерен колеблется от сотых долей миллиметра до 0,5 мм, основная масса зерен – от 0,07 до 0,25 мм. При исследовании полированных шлифов пирит наблюдается в виде неравномерной вкра-

пленности, гнезд и прожилков в арсенопирите с ситовидной микроструктурой. Мощность выделений – от первых миллиметров до 20 мм. Следует отметить, что в пирите отмечаются включения марказита и редкие мелкие включения халькопирита (рис. 7). Сульфид железа местами катаклазирован и замещен гидроксидами железа.

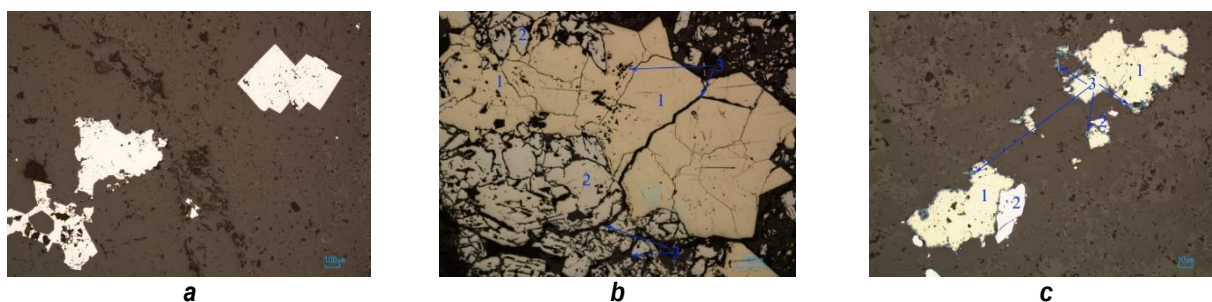


Рис. 7. Морфология и ассоциация пирита:

a – гипидиоморфные выделения пирита с ситовидной микротекстурой; *b* – пирит (1) в тесном сростании с арсенопиритом (2), по микротрещинам развиваются скородит и гидроксиды железа (3);
c – ксеноморфные выделения халькопирита (1) в тесном сростании с пиритом (2), по краям зерен халькопирит частично замещается ковеллином (3)
Полированные шлифы. Поляризатор ||

Fig. 7. Pyrite morphology and association

a – hypidiomorphic segregations of pyrite with a sieve microtexture; *b* – pyrite (1) closely aggregated with arsenopyrite (2), scorodite and iron hydroxides develop along microcracks (3); *c* – xenomorphic segregations of chalcopyrite (1) closely aggregated with pyrite (2), chalcopyrite partially replaced by covellite at the grain edges (3)
Polished sections. Polarizer ||



Халькопирит при микроскопическом исследовании фиксируется в виде зерен неправильной формы размером до 0,07 мм. Отмечаются микропрожилки халькопирита мощностью до 0,1 мм. Также халькопирит отмечается в сростках с арсенопиритом и пиритом (см. рис. 6). Более мелкие зерна сульфида меди наблюдаются в виде вкрапленности в сульфидах мышьяка и железа. По периферии зерен халькопирита развивается ковеллин. По данным микроанализа, в халькопирите отмечается примесь серебра.

Скородит в ассоциации с гидроксидами железа покрывает значительную поверхность зерен арсенопирита с образованием структур замещения, местами до полных псевдоморфоз. В агрегате из скородита и гидроксидов железа, по данным микроанализа, отмечается каплевидное вкрапление золота размером 10 микрон (рис. 8). Гидроксиды железа наблюдаются в тесной ассоциации со скородитом в виде сплошных масс, охр и псевдоморфоз по сульфидам.

По результатам атомно-абсорбционного анализа, содержание золота во фракции суль-

фидов (представленных, по данным рентгеноструктурного анализа, на 95 % арсенопиритом и на 5 % пиритом) составляет $(42,9 \pm 3,1)$ г/т. Микрочастицы самородного золота установлены в виде включений в арсенопирите, пирите и в качестве реликтов в лимоните и скородите (см. рис. 8).

Гранулометрию золота в исходной руде изучали на материале продуктов гравитации, полученных при стадийном понижении крупности помола руды. Из табл. 3 видно, что основная масса золотин – 69,8 % – представлена мелкими, тонкими и тонкодисперсными частицами золота (класса крупности $-0,07$ мм)¹⁰. На долю крупного золота (класс крупности $+0,07$ мм) приходится 30,2 %, из них около 23,4 % от общего количество благородного металла приходится на класс крупности $-0,25 + 0,1$ мм.

Пробность золота, по данным атомно-абсорбционного анализа, в пробе руды колеблется в диапазоне от 759 до 770 ‰ [22, 23]. По классификации Н.В. Петровской, золото соответствует относительно низкопробному классу.

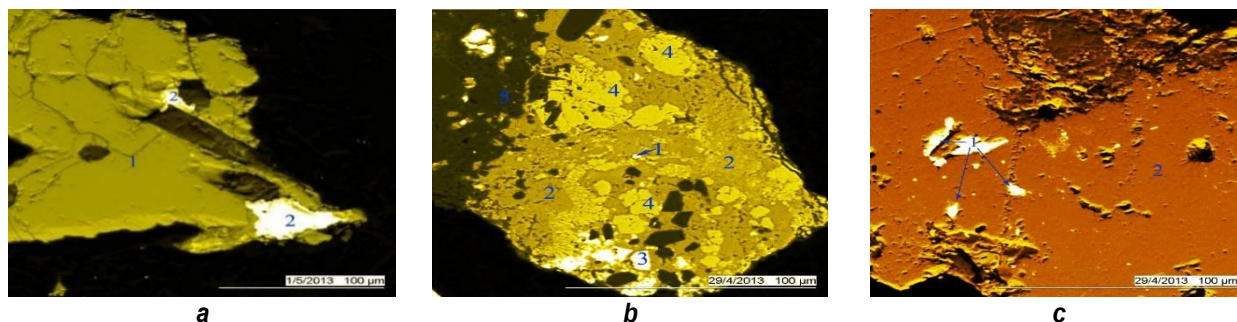


Рис. 8. Микрочастицы самородного золота:

a – в зерне арсенопирита (1) выделения золота (2) размером до 40 мкм; b – золото (1) в агрегате, состоящем из скородита (2), арсенопирита (3), пирита (4) и гидроксидов железа (5); c – вкрапления золота размером от 1 до 20 мкм (1) в зерне пирита (2)

Микроанализатор Camebax SX-50. Снимок в обратнорассеянных электронах. Брикетные шлифы

Fig. 8. Native gold microparticles:

a – gold precipitates (2) in an arsenopyrite grain (1) up to 40 μm in size;

b – gold (1) in an aggregate consisting of scorodite (2), arsenopyrite (3), pyrite (4) and iron hydroxides (5);

c – inclusions of gold from 1 to 20 μm in size (1) in a pyrite grain (2)

Camebax SX-50 microanalyzer. Snapshot in reverse order-scattered electrons. Briquette thin sections

Таблица 3. Гранулометрия золота в исходной руде

Table 3. Granulometry of gold in the head ore

Показатель	Класс крупности, мм						Всего
	-1,0+0,5	-0,5+0,25	-0,25+0,15	-0,15+0,1	-0,10+0,07	-0,07	
Массовая доля золота, %	1,4	2,9	13,8	9,6	2,5	69,8	100

¹⁰ Зеленов В.И. Методика исследования золото- и серебросодержащих руд. М.: Недра, 1989. 302 с.



Характеристика самородного золота приводится на основании его изучения в гравитационных концентратах. Цвет золотин – светло-желтый, желтый, грязно-желтый за счет сростков с сульфидами. Наиболее характерные формы частиц золота: неправильная компактная, комковатая, крючковатая, уплощенная, с неровными зазубренными краями, нередко с отростками различной длины, изометричная, реже пластинчатая с пережимами и короткими отростками [24, 25]. Форма и характер поверхности золота проиллюстрированы на рис. 9.

О минеральных ассоциациях руд. Изучение минерального состава руд позволяет нам выделить в их составе две ассоциации минералов: раннюю – арсенопирит-кварцевую и позднюю – пирит-халькопирит-турмалиновую золотоносную, формирование которой началось с отложения турмалина и пирротина, замещаемого марказитом, переходящим в пирит. Для последней ассоциации характерно также наличие единичных зерен галенита и

минералов висмута, которые можно предположительно объединить с самородным золотом (исходя из их позиции как микровключений) в самостоятельную ассоциацию.

Обсуждение полученных результатов

Сравнивая полученные нами результаты по рудопроявлению с материалами по составу руд месторождения [10, 11], можно отметить, с одной стороны, их близость и однотипность, а с другой – некоторые отличия (табл. 4).

Общими параметрами являются довольно высокая степень сульфидности руд и их сходный химический и минеральный состав с преобладанием арсенопирита и повышенной ролью висмута, преобладание мелкого золота и его сходные морфологические характеристики. Это позволяет рассматривать проявление как составную часть единой рудной системы месторождения. Небольшие различия в составе руд (меньшая пробность и крупность

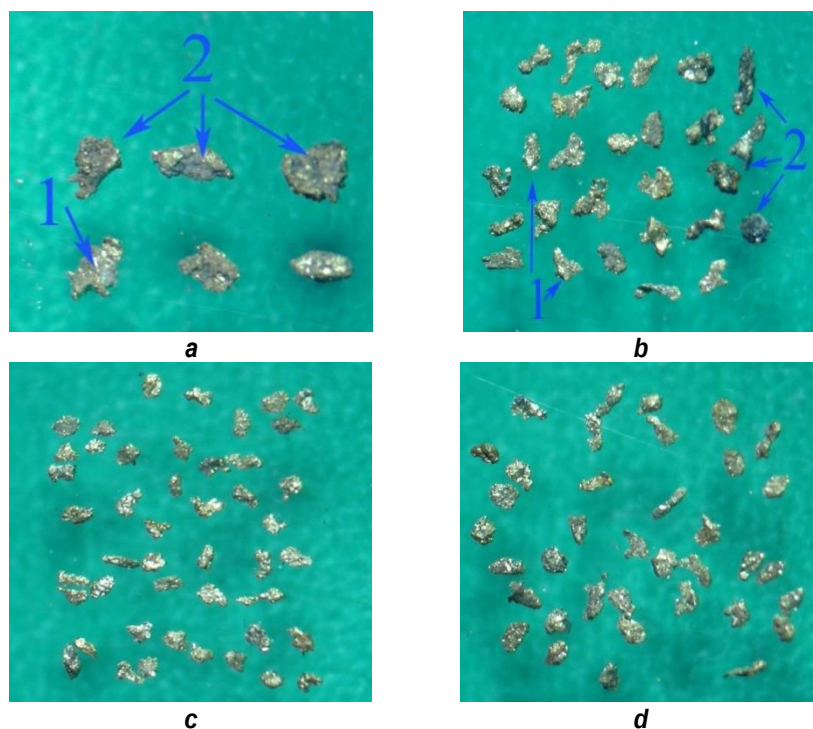


Рис. 9. Морфология и характер поверхности золотин по классам крупности:
а – класс крупности $-1+0,5$ мм (увеличение $40\times$); б – класс крупности $-0,5+0,25$ мм (увеличение $60\times$);
с – класс крупности $-0,25+0,16$ мм (увеличение $70\times$); д – класс крупности $-0,16+0,1$ мм (увеличение $70\times$)
Золотины в ассоциации с кварцем (1), с сульфидами (2). Гравиоконцентрат

Fig. 9. Morphology and nature of the gold grain surface by size classes:
а – size class $-1+0.5$ mm ($40\times$ magnification); б – size class $-0.5+0.25$ mm ($60\times$ magnification);
с – size class $-0.25+0.16$ mm ($70\times$ magnification); д – size class $-0.16+0.1$ mm ($70\times$ magnification)
Gold grains in association with quartz (1), with sulfides (2). Graviok concentrate



Таблица 4. Сравнение минерального состава руд рудопроявления и одного из золоторудных месторождений Восточного Забайкалья по результатам изучения технологических проб (по данным источников [9–11])

Table 4. Comparison of ore mineral composition of the ore occurrence and one of East Transbaikalian gold deposits based on the study results of technological samples (according to the sources [9–11])

Рудопроявление (одна проба)	Месторождение (три пробы)
Доля рудных минералов, включая окисленные фазы, %	
21,9	8,8–16,1
Рудная минералогия	
Арсенопирит – 6,8 % Пирит – 2,4 % Халькопирит – 0,1 % Пирротин – единичные знаки Галенит – единичные знаки Минералы висмута – единичные знаки	Арсенопирит – до 6,2 % Пирит – до 5,3 % Пирротин – до 2,6 % Халькопирит – до 1,3 % Сфалерит – до 0,1 % Галенит – до 0,6 %
Пробность золота	
759–770	878–854
Размерность золота	
Менее 0,074 мм – 69,8 %	Менее 0,074 мм – 50,6 %
Морфология золота	
В основном неправильная компактная, комковатая, крючковатая, уплощенная, с неровными зазубренными краями, нередко с отростками различной длины, изометричная, реже пластинчатая с пережимами и короткими отростками	В основном удлиненно-неправильная, уплощенная, пластинчатая с пережимами и короткими отростками, реже комковидно-неправильная, комковатая и ажурной формы
Содержание, %	
Кремнезем – 69,3 Сера – 2,65 Мышьяк – 6,6 Бор – 1 Висмут – 0,036	Кремнезем – 53,12–63 Сера общая – 0,18–5,14 Мышьяк – 0,15–2,8 Бор – 0,02–0,08 Висмут – 0,009–0,05

самородного золота, большая роль турмалина и бора в рудах рудопроявления) предполагают наличие элементов зональности оруденения в масштабе рудного поля, которая намечается, по данным источников [1, 2] и нашим наблюдениям [4], на самом месторождении.

В технологическом плане важным результатом исследования является то, что индикатором окисленности руд выступает форма нахождения мышьяка, а не серы. Равные количества окисленных и первичных сульфидных руд необходимо учитывать при раз-

работке технологической цепочки их переработки.

Заключение

По granulometрии золота можно сделать следующие выводы: золото образовывалось в схожих условиях с кварцем и сульфидами (так как часть золота находится с кварцем и сульфидами в ассоциации). По размерности золота на месторождении и рудопроявлении можно предположить, что основная его масса была образована на средних глубинах.

Список источников

1. Абрамов Б.Н. Условия образования и петрогеохимические особенности флюидно-эксплозивных образований золоторудных месторождений Восточного Забайкалья // Литосфера. 2015. № 1. С. 86–97.
2. Абрамов Б.Н. Верхне-Алиинское золоторудное месторождение: условия формирования, петрогеохимические особенности пород и руд (Мунгинский рудный узел, Восточное Забайкалье) // Литосфера. 2016. № 4. С. 92–101.
3. Балеysкое рудное поле (геология, минералогия, вопросы генезиса) / ред. Н.П. Лаверов, В.А. Нарсеев, Н.В. Петровская, Ю.Г. Сафонов. М.: Изд-во ЦНИГРИ, 1984. 271 с.
4. Горячев Н.А., Никанюк Т.С., Будяк А.Е. О рудной минерализации Верхне-Алиинского месторождения (Забайкальский край, Россия) // Современные направления развития геохимии: материалы Всерос. конф. с уч. заруб. ученых, посвящ. 65-летию Института



геохимии им. А.П. Виноградова и 105-летию со дня рожд. акад. Л.В. Таусона (г. Иркутск, 21–25 ноября 2022 г.). Иркутск: Изд-во ИГ СО РАН, 2022. Т. 1. С. 147–148.

5. Юргенсон Г.А., Грабеклис Р.В. Балеysкое рудное поле // Месторождения Забайкалья. М.: Геоинформмарк, 1995. Т. 1. Кн. 2. С. 19–32.

6. Виноградов А.П. Среднее содержание химических элементов в главных типах изверженных горных пород земной коры // Геохимия. 1962. № 7. С. 555–571.

7. Гладков В.Г., Корольков А.Т., Летунов С.П., Воросов А.Д. Морфологические особенности штокерного оруденения балеysкого типа (материалы детального картирования карьеров в масштабе 1:1000) // Условия образования и размещения золоторудных месторождений Сибири: сб. тез. Новосибирск, 1975. С. 129.

8. Прокофьев В.Ю. Геохимические особенности рудообразующих флюидов гидротермальных месторождений золота различных генетических типов (по данным исследования флюидных включений). Новосибирск: Наука, 2000. 190 с.

9. Мальцева Г.Д., Никанюк Т.С. Условия формирования оруденения некоторых гидротермальных месторождений золота // Известия Сибирского отделения Секции наук о Земле Российской академии естественных наук. Геология, поиски и разведка рудных месторождений. 2011. № 2. С. 25–30.

10. Никанюк Т.С., Мальцева Г.Д. Вещественный состав руд Верхне-Алиинского месторождения // Известия Сибирского отделения Секции наук о Земле Российской академии естественных наук. Геология, поиски и разведка рудных месторождений. 2008. № 6. С. 50–59.

11. Никанюк Т.С., Мальцева Г.Д. Вещественный состав – основа для технологической оценки золотосодержащих руд Верхне-Алиинского месторождения // Известия Сибирского отделения Секции наук о Земле Российской академии естественных наук. Геология, поиски и разведка рудных месторождений. 2009. № 1. С. 69–76.

12. Симонов Ю.И., Максимов С.С. Геодинамическая модель вулканоплутонических структур Забайкалья и принципы крупномасштабного прогнозирования золота // Структуры рудных полей вулканических поясов: материалы Всесоюз. совещ. Владивосток, 1985. Вып. 1. С. 16–18.

13. Четкин В.С., Трубочев А.И. Минеральные ресурсы Забайкальского края. Чита: Изд-во РНИУМЛ ЗабГУ, 2013. 231 с.

14. Трубочев А.И., Секисов А.Г., Лавров А.Ю. Ассоциации минералов и элементов в рудах и продуктах обогащения восточнозбайкальских месторождений

цветных и благородных металлов // Известия Сибирского отделения Секции наук о Земле Российской академии естественных наук. Геология, поиски и разведка рудных месторождений. 2016. № 3. С. 44–56. <https://doi.org/10.21285/0130-108X-2016-56-3-44-56>.

15. Андреева М.Г. Особенности состава и размещения минеральных ассоциаций и элементы зональности в пределах Балеysкого рудного поля и его периферии // Труды ЦНИГРИ. 1971. Вып. 96. Ч. 1. С. 32–45.

16. Бородаевская М.Б. Некоторые особенности петрогенезиса формации малых интрузий послевулканического возраста в одном из районов Восточного Забайкалья // Известия Академии наук СССР. Серия Геологическая. 1956. № 6. С. 70–91.

17. Кривоуцкая Н.А. Парагенетические ассоциации минералов и условия образования руд Ключевского месторождения золота (Восточное Забайкалье, Россия) // Геология рудных месторождений. 1997. № 4. С. 344–361.

18. Плюсин Г.С., Спиридонов А.М., Литвинцев К.А., Кочеткова Л.Ф., Гнилуша В.А., Кузнецова С.В. Rb-Sr возраст щелочных гранитов Карийского рудного узла (Восточное Забайкалье) // Доклады Академии наук СССР. 1989. Т. 307. № 4. С. 967–971.

19. Спиридонов А.М., Зорина Л.Д., Китаев Н.А. Золотоносные рудно-магматические системы Забайкалья. Новосибирск: Гео, 2006. 291 с.

20. Спиридонов А.М., Зорина Л.Д., Летунов С.П., Прокофьев В.Ю. Флюидный режим процесса рудообразования Балеysкой золоторудно-магматической системы (Восточное Забайкалье) // Геология и геофизика. 2010. Т. 51. № 10. С. 1413–1422.

21. Комаров П.В., Томсон И.Н. Возрастная последовательность оруденения и плутоногенные минерогенетические циклы на примере Восточного Забайкалья // Отечественная геология. 1995. № 10. С. 26–36.

22. Петровская Н.В. Самородное золото (общая характеристика, типоморфизм, вопросы генезиса). М.: Наука, 1973. 348 с.

23. Петровская Н.В., Сафонов Ю.Г., Шер С.Д. Формации золоторудных месторождений // Рудные формации эндогенных месторождений. М.: Наука, 1976. Т. 2. С. 3–110.

24. Петровская Н.В. Характер золотоносных минеральных ассоциаций и формации золотых руд СССР // Генетические проблемы руд: сб. докл. М.: Госгеолтехиздат, 1960. С. 145–159.

25. Николаева Л.А., Яблокова С.В. Типоморфные особенности самородного золота и их использование при геологоразведочных работах // Руды и металлы. 2007. № 6. С. 41–57.

References

1. Abramov B.N. Forming conditions and petrogeochemical particularities of fluid-explosive productions from gold deposits of Eastern Transbaikalia. *Litosfera = Lithosphere (Russia)*. 2015;(1):86-97. (In Russ.).

2. Abramov B.N. Verkhne-Aliinsky gold deposit: Conditions of formation, petrogeochemical features of rocks and ores (Munginsk ore cluster, Eastern Transbaikalia).

Litosfera = Lithosphere (Russia). 2016;(4):92-101. (In Russ.).

3. Laverov N.P., Narseev V.A., Petrovskaya N.V., Safonov Yu.G. Baleiskoe ore field (geology, mineralogy, genesis issues). Moscow: Central Research Institute of Geological Prospecting for Base and Precious Metals; 1984. 271 p. (In Russ.).

4. Goryachev N.A., Nikanyuk T.S., Budyak A.E. On ore



mineralization of the Verkhne-Aliinsky deposit (Trans-Baikal, Russia). In: *Sovremennye napravleniya razvitiya geokhimii: materialy Vseros. konf. s uch. zarubezhn. uchenykh, posvyashch. 65-letiyu Instituta geokhimii im. A.P. Vinogradova i 105-letiyu so dnya rozhd. akad. L.V. Tausona = Modern development trends in geochemistry: materials of All-Russian conference with the participation of foreign scientists dedicated to the 65th anniversary of the A.P. Vinogradov Institute of Geochemistry and the 105th birth anniversary of the Academician L.V. Tauson*. 21–25 November 2022, Irkutsk. Irkutsk: V.B. Sochava Institute of Geography SB RAS; 2022, vol. 1, p. 147–148. (In Russ.).

5. Yurgenson G.A., Grabeklis R.V. Baleiskoe ore field. In: *Mestorozhdeniya Zabaikal'ya = Transbaikalian deposits*. Moscow: Geoinformmark; 1995, vol. 1, book. 2, p. 19–32. (In Russ.).

6. Vinogradov A.P. The average content of chemical elements in the main types of igneous rocks of the earth's crust. *Geokhimiya*. 1962;7:555-571. (In Russ.).

7. Gladkov V.G., Korol'kov A.T., Letunov S.P., Vorosov A.D. Morphological features of stockwork mineralization of the Baley type (materials of the detailed open-cast mapping on a scale of 1:1000). In: *Usloviya obrazovaniya i razmeshcheniya zolotorudnykh mestorozhdenii Sibiri = Conditions of gold deposit formation and location in Siberia*. Novosibirsk; 1975, p. 129. (In Russ.).

8. Prokof'ev V.Yu. *Geochemical features of ore-forming fluids of hydrothermal gold deposits of various genetic types (according to the study of fluid inclusions)*. Novosibirsk: Nauka; 2000. 190 p. (In Russ.).

9. Maltzeva G.D., Nikanuk T.S. Conditions of ore formation of some hydrothermal gold deposits. *Izvestiya Sibirskogo otdeleniya Sektii nauk o Zemle Rossiiskoi akademii estestvennykh nauk. Geologiya, poiski i razvedka rudnykh mestorozhdenii = Proceedings of the Siberian Department of the Section of Earth Sciences, Russian Academy of Natural Sciences. Geology, Prospecting and Exploration of Ore Deposits*. 2011;2:25-30. (In Russ.).

10. Nikanuk T.S., Maltzeva G.D. Ore composition of the Verkhne-Aliinsk gold ore deposit. *Izvestiya Sibirskogo otdeleniya Sektii nauk o Zemle Rossiiskoi akademii estestvennykh nauk. Geologiya, poiski i razvedka rudnykh mestorozhdenii = Proceedings of the Siberian Department of the Section of Earth Sciences, Russian Academy of Natural Sciences. Geology, Prospecting and Exploration of Ore Deposits*. 2008;6:50-59. (In Russ.).

11. Nikanjuk T.S., Mal'tzeva G.D. Substance composition as the basis for technological estimation of gold-bearing ores of Higher-Aliinsk gold ore deposit. *Izvestiya Sibirskogo otdeleniya Sektii nauk o Zemle Rossiiskoi akademii estestvennykh nauk. Geologiya, poiski i razvedka rudnykh mestorozhdenii = Proceedings of the Siberian Department of the Section of Earth Sciences, Russian Academy of Natural Sciences. Geology, Prospecting and Exploration of Ore Deposits*. 2009;1:69-76. (In Russ.).

12. Simonov Yu.I., Maksimov S.S. Geodynamic model of volcano-plutonic structures of Transbaikalia and principles of large-scale gold forecasting. In: *Struktury rudnykh polei vulkanicheskikh pojasov: materialy Vsesoyuzn. Soveshch. = Structures of ore fields of volcanic belts:*

Materials of the All-Union meeting. Vladivostok; 1985, iss. 1, p. 16–18. (In Russ.).

13. Chechetkin V.S., Trubachev A.I. *Mineral resources of Transbaikalia*. Chita: Transbaikalian State University; 2013. 231 p. (In Russ.).

14. Trubachev A.I., Sekisov A.G., Lavrov A.Yu. Associations of minerals and elements in ores and dressing products of east Baikal base and precious metal deposits. *Izvestiya Sibirskogo otdeleniya Sektii nauk o Zemle Rossiiskoi akademii estestvennykh nauk. Geologiya, poiski i razvedka rudnykh mestorozhdenii = Proceedings of the Siberian Department of the Section of Earth Sciences, Russian Academy of Natural Sciences. Geology, Prospecting and Exploration of Ore Deposits*. 2016;3:44-56. <https://doi.org/10.21285/0130-108X-2016-56-3-44-56>.

15. Andreeva M.G. Composition and distribution features of mineral associations and zoning elements within the Baleiskoe ore field and its periphery. *Trudy TsNIGRI*. 1971;96(1):32-45. (In Russ.).

16. Borodaevskaya M.B. Some features of small intrusion formation petrogenesis of post-Upper Jurassic age in one of the regions of Eastern Transbaikalia. *Izvestiya Akademii nauk SSSR. Seriya Geologicheskaya*. 1956;6:70-91. (In Russ.).

17. Krivolutsкая N.A. Paragenetic associations of minerals and ore formation conditions at the Klyuchevskoye gold deposit (Eastern Transbaikalia, Russia). *Geologiya rudnykh mestorozhdenii*. 1997;4:344-361. (In Russ.).

18. Plyusnin G.S., Spiridonov A.M., Litvintsev K.A., Kochetkova L.F., Gnilusha V.A., Kuznetsova C.B. Rb-Sr age of alkaline granites of the Kariisky ore cluster (Eastern Transbaikalia). *Doklady Akademii nauk SSSR*. 1989;307(4):967-971. (In Russ.).

19. Spiridonov A.M., Zorina L.D., Kitaev N.A. *Gold-bearing ore-magmatic systems of Transbaikalia*. Novosibirsk: Geo; 2006. 291 p. (In Russ.).

20. Spiridonov A.M., Zorina L.D., Letunov S.P., Prokof'ev V.Yu. The fluid regime of ore formation in the balei gold-bearing ore-magmatic system (eastern Transbaikalia). *Geologiya i geofizika = Russian Geology and Geophysics*. 2010;51(10):1413-1422. (In Russ.).

21. Komarov P.V., Tomson I.N. Mineralization age and plutogenic mineragenic cycles on the example of Eastern Transbaikalia. *Otechestvennaya Geologiya = National Geology*. 1995;10:26-36. (In Russ.).

22. Petrovskaya N.V. *Native gold (general characteristics, typomorphism, genesis issues)*. Moscow: Nauka; 1973. 348 p. (In Russ.).

23. Petrovskaya N.V., Safonov Yu.G., Sher S.D. Formations of gold deposits. In: *Rudnye formatsii endogennykh mestorozhdenii = Ore formations of endogenous deposits*. Moscow: Nauka; 1976, vol. 2, p. 3–110. (In Russ.).

24. Petrovskaya N.V. The nature of gold-bearing mineral associations and gold ore formations in the USSR. In: *Geneticheskie problemy rud = Genetic problems of ores*. Moscow: Gosgeoltekhizdat; 1960, p. 145–159. (In Russ.).

25. Nikolaeva L.A., Yablokova S.V. Typomorphic features of native gold and their use in geological exploration. *Rudy i metally = Ores and Metals*. 2007;6:41-57. (In Russ.).

**Информация об авторе / Information about the author****Никанюк Татьяна Сергеевна,**

младший научный сотрудник Отдела обогащения минерального сырья,
АО «ИРГИРЕДМЕТ»,

г. Иркутск, Россия,

аспирант,

Институт геохимии им. А.П. Виноградова СО РАН,

г. Иркутск, Россия,

✉ tnikanuk@irgiredmet.ru

Tatiana S. Nikanyuk,

Junior Researcher of the Department of Mineral Raw Material Concentration,
JSC IRGIREDMET,

Irkutsk, Russia,

Postgraduate Student,

Vinogradov Institute of Geochemistry SB RAS,

Irkutsk, Russia,

✉ tnikanuk@irgiredmet.ru

Вклад автора / Contribution of the author

Автор выполнил исследовательскую работу, на основании полученных результатов провел обобщение, подготовил рукопись к печати.

The author performed the research, made a generalization on the basis of the results obtained and prepared the copyright for publication.

Конфликт интересов / Conflict of interests

Автор заявляет об отсутствии конфликта интересов.

The author declares no conflicts of interests.

Автор прочитал и одобрил окончательный вариант рукописи.

The final manuscript has been read and approved by the author.

Информация о статье / Information about the article

Статья поступила в редакцию 22.09.2022; одобрена после рецензирования 10.03.2023; принята к публикации 16.03.2023.

The article was submitted 22.09.2022; approved after reviewing 10.03.2023; accepted for publication 16.03.2023.



Научная статья

УДК 544.774+66.04

<https://doi.org/10.21285/2686-9993-2023-46-1-51-60>



Исследование свойств песков Прибайкалья

А.А. Яковлева^а, Е.А. Гусева^б, М.В. Константинова^с

^{а-с}Иркутский национальный исследовательский технический университет, г. Иркутск, Россия

Резюме. Целью представленной работы стало детальное определение тепловых свойств песков Байкальского региона (Россия) и установление их зависимости от геолого-минералогических характеристик для оценки возможности использования этого сырья в пищевой отрасли. Объектами исследования служили пробы песков, отобранные на юго-западном побережье озера Байкал, предметом исследования являлся минералогический состав песка, его гранулометрический состав и теплоемкость. Минеральный состав проб песков и их кристаллическая структура исследовались при помощи метода рентгенографического фазового анализа. Для гранулометрической оценки песков использовался стандартный метод ситового анализа. Средняя теплоемкость проб песков определялась методом смешивания. На основании анализа полученных рентгенограмм был определен минералогический состав изучаемых проб. Установлено, что в их составе преобладает минерал кварц – он содержится в пробах в количестве 40–60 %. В разных пробах доля таких минералов, как альбит и анортоклаз, составляла 15–30 %. Менее 5 % в каждой пробе приходилось на долю диккита и индиалита. Антофиллит присутствовал только в одной пробе в количестве около 9 %. Результаты определения гранулометрического состава показали, что в большинстве проб можно выделить фракцию, на долю которой приходится 70–90 %. Только в пробе из города Слюдянки примерно в равных количествах присутствовали фракции разной крупности. Для этой пробы была установлена зависимость теплоемкости от гранулометрического состава. Для прочих проб различие определенных значений теплоемкости хорошо коррелировало с их минералогическим составом. Результаты проведенных исследований и их анализ позволяют сделать вывод, что с точки зрения высокой теплоемкости наиболее привлекательны пески из Слюдянки и Байкальска. Для использования в качестве термоаккумулирующего вещества наиболее подходящим является песок с размером зерен от 0,125 до 0,25 мм. Даная фракция является преобладающей в песке города Байкальска.

Ключевые слова: песок, рентгенография, гранулометрия, минералогический состав, теплоемкость

Для цитирования: Яковлева А.А., Гусева Е.А., Константинова М.В. Исследование свойств песков Прибайкалья // Науки о Земле и недропользование. 2023. Т. 46. № 1. С. 51–60. <https://doi.org/10.21285/2686-9993-2023-46-1-51-60>.

Original article

Studying Baikal region sand properties

Ariadna A. Yakovleva^a, Elena A. Guseva^b, Marina V. Konstantinova^c

^{a-c}Irkutsk National Research Technical University, Irkutsk, Russia

Abstract. The study is aimed at a more detailed determination of the thermal properties of Baikal region sands and establishment of their dependence on geological and mineralogical characteristics in order to assess the possibility of using this raw material in the food industry. The objects of the study are sands sampled on the southwestern coast of Lake Baikal. The subject of the study is the mineralogical composition of sand, its grain size composition and heat capacity. The mineral composition of sand samples and their crystal structure were studied using the method of X-ray phase analysis. A standard sieve analysis method was used for granulometric estimation of sands. The average heat capacity of sand samples was determined by the mixing method. Based on the analysis of the obtained X-ray diffraction patterns, the mineralogical composition of the studied samples was determined. It was found that quartz predominates in their composition since its percentage in samples amounts to 40–60 %. The proportion of such minerals as albite and anorthoclase is 15–30 % in different samples. Less than 5 % in each sample accounts for dickite and indialite. The presence of the mineral of anthophyllite has been found only in one sample in the amount of about 9 %. The results of granulometric composition determination show that a fraction, which accounts for 70–90 %, can be isolated in most samples. The sample from the town of Slyudyanka was the only one where the fractions of different sizes were present in approximately equal amounts. For this sample, the dependence of heat capacity on the grain size was determined. In other samples, the difference in certain heat capacity values correlated well with their mineralogical composition. The results of the conducted studies and their analysis

© Яковлева А.А., Гусева Е.А., Константинова М.В., 2023



allow to conclude that Slyudyanka and Baikalsk sands are the most attractive sands in terms of high heat capacity. The sand with the grain size from 0.125 to 0.25 mm is found to be the most suitable for the use as a thermal storage medium. This fraction is predominant in the sand of the town of Baikalsk.

Keywords: sand, X-ray diffraction pattern, grain size analysis, mineralogical composition, heat capacity

For citation: Yakovleva A.A., Guseva E.A., Konstantinova M.V. Studying Baikal region sand properties. *Nauki o Zemle i nedropol'zovanie* = *Earth sciences and subsoil use*. 2023;46(1):51-60. (In Russ.). <https://doi.org/10.21285/2686-9993-2023-46-1-51-60>.

Введение

Песок является уникальным природным материалом, ему присущи разнообразные свойства, которые делают его применение практически повсеместным¹. К основным сферам использования песка относятся промышленное, гражданское и дорожное строительство, металлургия, стекольная промышленность [1, 2], что предполагает огромные объемы его добычи. Это не может не отражаться на окружающей среде: происходят нарушения баланса биосферы, изменения ландшафта [3–6].

Такие качества песка, как химическая инертность, неизменность состава и высокая механическая прочность, находят применение в медицине (физиолечение, спа-процедуры, курортные лечебницы). Лечение горячим песком (псаммотерапия) приобрело особую популярность в последнее десятилетие, хотя свои истоки имеет в далекой древности [7, 8].

Песок является уникальным фильтрующим материалом, способным поглощать и задерживать вредные вещества. Благодаря этому он активно используется при фильтрации воды практически во всех производственных процессах, причем очистке подвергается не только питьевая вода, но также и технологические и отработанные сточные воды² [9–16].

Особо следует отметить такое свойство песка, как способность сохранять тепло длительное время. Теплопроводность и теплоемкость песка таковы, что после нагревания он способен сохранять изотермичность рабочего пространства без резких перепадов температуры³.

Цель настоящего исследования заключалась в определении теплоемкости некоторых проб песков байкальского региона и установлении зависимости тепловых свойств от геолого-минералогических характеристик, а также в попытке оценить возможность применения песков в пищевой промышленности в качестве теплоаккумулирующего материала. Как известно, все свойства песка, в том числе и тепловые, зависят от его состава – как минералогического, так и гранулометрического⁴ [17]. В связи с этим для достижения поставленной цели было проведено комплексное исследование нескольких проб песков, отобранных в различных местах юго-запада Прибайкалья.

Стоит заметить, что найти результаты систематических и обобщающих исследований в литературе не удалось, поскольку пески Сибири пока еще мало изучены с этой точки зрения. Представляется, что попытка нестандартного подхода к возможности применения местного сырья может оказаться интересной и полезной.

Материалы и методы исследования

Объектами исследования явились пробы песка с берегов озера Байкал. Часть образцов песка была отобрана вблизи населенных пунктов юго-западного Прибайкалья – поселка Ангасолка и городов Байкальска и Слюдянки. Пески из бухты Обутеихи и с побережья острова Хужир представляют образцы тех рекреационных зон, где активно развивается туризм и формируются зоны отдыха. Выбор

¹ Рыбьев И.А. Строительное материаловедение: учебник. В 2 ч. Ч. 2. М.: Юрайт, 2023. 429 с.

² Краснова Т.А., Юстратов В.П., Позняковский В.М. Экспертиза питьевой воды. Качество и безопасность: учеб. пособие. М.: Делфи принт, 2011. 278 с.

³ Бабичев А.П. [и др.]. Физические величины: справочник / ред. И.С. Григорьев, Е.З. Мейлихов. М.: Энергоатомиздат, 1991. 1231 с.

⁴ Verma A. Evaluation of sea sand and river sand properties and their comparison: report. Taiwan: National Dong Hwa University, 2015. 35 p.



мест отбора predetermined целью исследования и позволяет оценить разнообразие минералогического состава песков, его связь с теплоемкостью и возможность использования того или иного песка в качестве термоаккумулирующей среды в сфере общественного питания. Месторасположение точек отбора проб песка представлено на рис. 1.

Предметом исследования являлся минералогический состав песка, его гранулометрический состав и теплоемкость.

Минеральный состав проб песков и их кристаллическую структуру исследовали при помощи метода рентгенографического фазового анализа на дифрактометре Bruker D8 Advance с расшифровкой полученных результатов с использованием программы Toras 3.0 [18].

Для гранулометрической оценки песков использовали стандартный метод ситового

анализа. Метод заключается в просеивании исследуемых проб песка на установке с набором стандартных сит, имеющих различный диаметр ячеек, и последующем взвешивании полученных фракций. В ходе опытов было определено относительное содержания фракций, содержащих частицы в более узком диапазоне размеров.

Среднюю теплоемкость проб песков определяли методом смешивания⁵. Для этого использовали адиабатический калориметр и термометр Бекмана, который обеспечивает высокую точность измерения температуры. Метод смешивания предполагает приведение в соприкосновение двух сред: рабочей жидкости и исследуемого вещества. В качестве рабочей жидкости обычно используют воду комнатной температуры, потому что ее нагревание в ходе опыта легко контролировать.

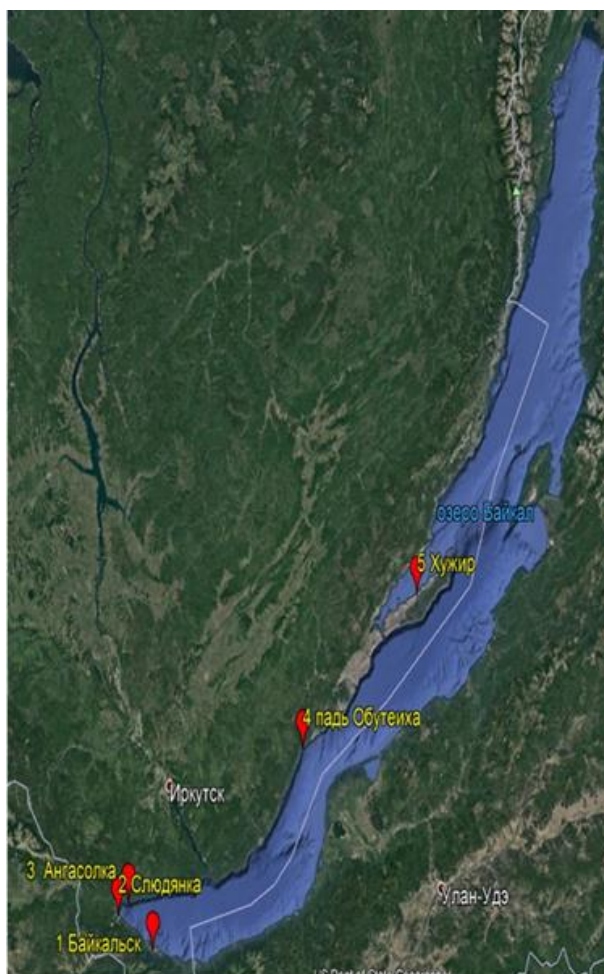


Рис. 1. Расположение точек отбора проб песка

Fig. 1. Location of sand sampling points

⁵ Пригожин И., Кондепуди Д. Современная термодинамика. От тепловых двигателей до диссипативных структур: учебник / пер. с англ. М.: Мир, 2002. 461 с.



Исследуемое вещество обычно предварительно нагревают до известной температуры, помещая в термостат в специальном контейнере. Отсчет показаний термометра Бекмана, находящегося в рабочей жидкости, начинается с момента погружения в нее контейнера с навеской исследуемого вещества (песка). Его среднюю теплоемкость можно вычислить по уравнению теплового баланса, важной составляющей которого является экспериментально определенный перепад температуры.

Для обеспечения достоверности экспериментальных результатов при проведении ситового анализа и термохимических опытов проводили несколько параллельных измерений. В процессе математической обработки экспериментальных данных использовали стандартную программу Excel, в которой высокое значение коэффициента аппроксимации гарантирует достоверность результатов.

Результаты исследования и их обсуждение

Пески юго-западного побережья озера Байкал внешне имеют различие по цвету, размеру зерен, форме частиц [19, 20].

Рентгеноструктурный анализ позволяет

определить минералогический состав песков по результатам расшифровки дифрактограмм (рис. 2). Результаты рентгенографического фазового анализа показывают наличие в песках таких типичных минералов, как кварц (SiO_2), полевые шпаты (альбит ($\text{Na}[\text{AlSi}_3\text{O}_8]$) и анортоклаз ($(\text{Na},\text{K})[\text{AlSi}_3\text{O}_8]$)), а также некоторых других минералов. В песке поселка Ангасолка, кроме того, в значительном количестве присутствует антофиллит ($(\text{Mg},\text{Fe})_7(\text{OH})_2 \cdot [\text{Si}_8\text{O}_{22}]$).

При этом соотношения минералов в песках существенно различаются, несмотря на то, что места отбора проб сосредоточены в достаточно небольшой области. Очевидно, в этом проявляется известное в геологии положение о том, что разнообразие песков обеспечивается процессами физического выветривания горных пород, переноса, отложений и переотложений продуктов разрушения [21, 22].

Во многих исследуемых песках кварц является преобладающей составляющей. Для кристаллов кварца характерно поперечное удлинение, различный цвет, чаще молочно-белые или серые окраски, и это обнаруживается визуально в песках, отобранных в пади Обутеихе и городах Байкальске и Слюдянке.

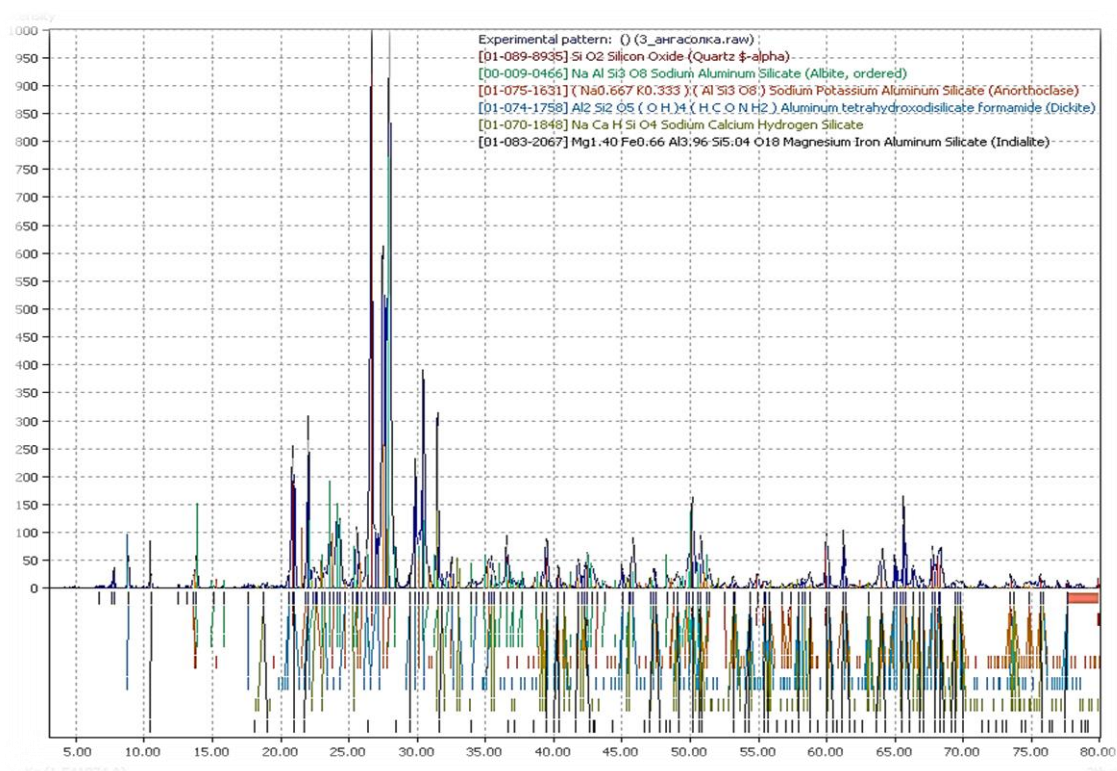


Рис. 2. Дифрактограмма песков пос. Ангасолка
Fig. 2. X-ray diffraction pattern of sands of the Angasolka settlement



Для большинства песков характерно стремление к однородности и монодисперсности с разной степенью зернистости. В табл. 1 представлен анализ фракционного состава и показана доля фракций с некоторым преобладающим размером – средним размером, который обычно определяется по максимуму на кривой распределения.

Исключением является разнотернистый песок из Слюдянки, в котором крупнозернистые фракции с размером частиц более 0,25 мм составляют 58 % (рис. 3).

Гранулометрический состав проб песка влияет на сферу его использования, например, для фильтрации воды используется песок средней зернистости [23]. Из рассмотрен-

ных, на наш взгляд, наиболее приемлемыми для этого случая могут быть пески, отобранные в городе Слюдянке и в пади Обутеихе.

Экспериментально определенные значения теплоемкости этих, а также остальных песков представлены в табл. 2.

Из табл. 2 следует, что полученные значения теплоемкости исследуемых песков коррелируют со справочными данными⁶, представленными в табл. 3.

Самым теплоемким оказывается песок из Слюдянки, следом идут близкие по значениям теплоемкости пески, взятые в Обутеихе и Байкальске. Три этих пробы песка по результатам рентгенографического фазового анализа содержат максимальное количество кварца,

Таблица 1. Оценка гранулометрических соотношений

Table 1. Estimation of granulometric ratios

Место отбора	Содержание фракции с преобладающим размером, масс. %	Средний размер, мм
Слюдянка	21	≥ 2
Байкальск	75	0,188
Обутеиха	83	0,75
Хужир	72	0,094
Ангасолка	93	0,094

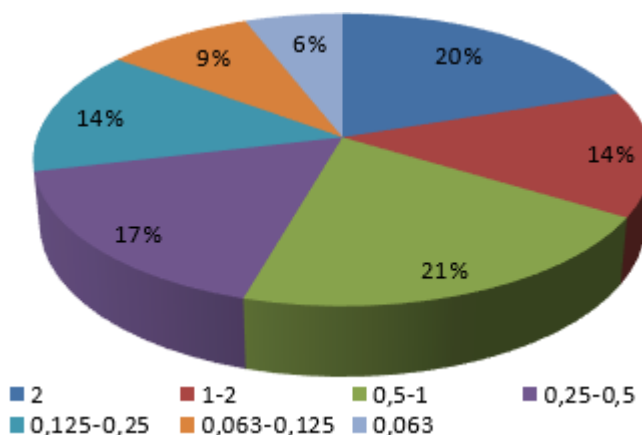


Рис. 3. Гранулометрический состав песка г. Слюдянки

В условных обозначениях приведена зернистость песка, мм

Fig. 3. Granulometric composition of sand from Slyudyanka town

The legend shows the grain size of the sand, mm

Таблица 2. Теплоемкость песков

Table 2. Heat capacity of sands

Место отбора	Удельная теплоемкость, Дж/(кг·К)
Слюдянка	772,5
Байкальск	704,5
Обутеиха	700,5
Хужир	670
Ангасолка	592

⁶ Бабичев А.П. [и др.]. Физические величины: справочник / ред. И.С. Григорьев, Е.З. Мейлихов. М.: Энергоатомиздат, 1991. 1231 с.



которое колеблется в диапазоне от 55 до 60 масс. %. Как следует из табл. 3, в которой приведены справочные значения теплоемкостей чистых минералов, именно кварц обеспечивает высокие значения теплоемкости рассматриваемых песков.

Теплоемкость песков из поселков Ангасолка и Хужир существенно ниже. Полученные данные можно объяснить также исходя из минерального состава. Распределение базовых минералов (кварца и полевых шпатов) в песках приведено в табл. 4.

На примере песка из Слюдянки было проведено определение зависимости теплоемкости от размеров зерен. Термохимические опыты проводились для каждой фракции отдельно. Было установлено, что при использовании песка, представленного разными фракциями, их теплоемкость различается и снижается с ростом размеров зерна (табл. 5).

Для фракционированного песка из Слюдянки характерны более высокие значения теплоемкости, суммарно дающие около 890 Дж/(кг·К). В литературе встречаются такие значения теплоемкости песков, причем в боль-

шинстве случаев при этом отсутствуют какие-либо уточняющие данные по дисперсности и геохимическому составу. Расхождение результатов, очевидно, связано с влиянием поверхностных эффектов. Поскольку теплоемкость является функцией микросостояний системы⁷, то для случаев тонкораздробленных частиц число таких микросостояний возрастает, то есть существенную роль приобретает дисперсность и величина удельной поверхности.

Дисперсные частицы, имея достаточно плотную регулярную упаковку, но большее межзеренное пространство (по сравнению с монокристаллами), обеспечивают материалу особые нехарактерные свойства [24–26]. Дробление приводит к росту межзеренной поверхности и увеличению числа частиц с энергетически не скомпенсированными связями, что сказывается на теплофизических качествах материала. По мере измельчения вещества возрастает значимость качества и числа микросостояний на поверхности таких частиц, и возможно, что этот эффект сказывается на полученных результатах.

Таблица 3. Теплоемкость некоторых минералов

Table 3. Heat capacity of some minerals

Минерал	Теплоемкость, Дж/(кг·К)
Кварц	750
Альбит	711
Анортоклаз	628

Таблица 4. Содержание основных минералов в песках пос. Ангасолка и Хужир

Table 4. The content of main minerals in the sands of Angasolka and Khuzhir settlements

Минерал	Место отбора и содержание минералов, масс. %	
	Ангасолка	Хужир
Кварц	23,23	35,81
Альбит	27,73	29,92
Анортоклаз	36,17	31,78

Таблица 5. Теплоемкость отдельных фракций песка г. Слюдянки

Table 5. Heat capacity of individual sand fractions of Slyudyanka town

Параметр	Значение			
Размер ячейки сита, мм	0,25–0,5	0,5–1	1–2	> 2
Содержание фракции в пробе, %	17	21	14	20
Теплоемкость, Дж/(кг·К)	973	982	839	773

⁷ Пригожин И., Кондепуди Д. Современная термодинамика. От тепловых двигателей до диссипативных структур: учебник / пер. с англ. М.: Мир, 2002. 461 с.



Обнаруженный эффект свидетельствует о значимости степени полидисперсности при выборе песка для тех или иных целей. Очевидно, для использования в пищевой сфере необходимо иметь песок достаточно монодисперсный. Это обеспечит более мягкие условия теплообмена, а с практической точки зрения это удобно потому, что может исключить процессы расслаивания между крупными и мелкими частицами.

Выполненные исследования позволяют оценить возможность применения песка в пищевой промышленности в сфере общественного питания в качестве термоаккумулирующего вещества и попытаться понять, какой из них является для этого наиболее подходящим.

Заключение

На основе анализа результатов проведенных исследований могут быть сделаны следующие выводы:

1. Теплоемкость песка, используемого в качестве термоаккумулирующего вещества, должна быть достаточно высокой. С этой точки зрения привлекательны пески из Слюдянки и Байкальска.

2. С точки зрения гранулометрии наиболее подходящим является песок с размером зерен от 0,125 до 0,25 мм. При этом более мелкие фракции должны быть исключены во избежание пылеобразования. Песок из Байкальска наиболее удовлетворяет данным условиям: он содержит наибольшее количество такой фракции, является однородным, а кроме того, внешне привлекательным, что немаловажно для зрительного восприятия. Песок из Слюдянки относится к разнозерно-

вому типу, что может обеспечить разнообразие его применения после разделения на фракции (для фильтрования, термостатирования и т. п.).

3. Необходимо помнить о месторасположении и использовании песка без ущерба для природы. Для снижения неуправляемости антропогенного воздействия при организации отдыха должны соблюдаться государственные законы в области экологии и защиты окружающей среды. Под эти рассуждения попадает песок с острова Ольхон. Иная ситуация складывается в отношении песка из Ангасолки, где имеется достаточно масштабное производство щебня, песка и отсева на Ангасольском щебеночном заводе – филиале АО «Первая нерудная компания», однако для использования в пищевой промышленности, на наш взгляд, данный песок ценности не представляет.

4. Таким образом, песок Байкальска оказывается удовлетворительным со всех точек зрения: теплоемкость его достаточно высока, по гранулометрическому составу песок в меру однороден, и особых усилий при подготовке его к использованию не потребуется. Город Байкальск находится в доступном, привлекательном и перспективном для развития туризма месте и имеет развитую инфраструктуру. Доступность и гарантия длительного и устойчивого состояния данного сырьевого ресурса не вызывают сомнений. Свойства песка позволяют использовать его в течение неограниченного по продолжительности времени с учетом того, что специфика его применения в пищевой отрасли не предполагает заметного расходования.

Список источников

1. Chen Y. Construction: limit China's sand mining // *Nature*. 2017. Vol. 550. P. 457. <https://doi.org/10.1038/550457c>.
2. Al-Harthy A.S., Abdel Halim M., Taha R., Al-Jabri K.S. The properties of concrete made with fine dune sand // *Construction and Building Materials*. 2007. Vol. 21. Iss. 8. P. 1803–1808. <https://doi.org/10.1016/j.conbuildmat.2006.05.053>.
3. Gelabert P.A. Environmental effects of sand extraction practices in Puerto Rico // *Managing Beach Resources in the Smaller Caribbean Islands: workshop papers* (Mayagüez, 21–25 October 1996). Mayagüez: UPR Sea Grant Printers, 1997. P. 63–68.

4. Bayram A., Önsoy H. Sand and gravel mining impact on the surface water quality: a case study from the city of Tirebolu (Giresun Province, NE Turkey) // *Environmental Earth Science*. 2015. Vol. 73. P. 1997–2011. <https://doi.org/10.1007/s12665-014-3549-2>.
5. Brunier G., Anthony E.J., Goichot M., Provansal M., Dussouillez P. Recent morphological changes in the Mekong and Bassac river channels, Mekong delta: the marked impact of river-bed mining and implications for delta destabilization // *Geomorphology*. 2014. Vol. 224. P. 177–191. <https://doi.org/10.1016/j.geomorph.2014.07.009>.
6. Khan S., Sugie A. Sand mining and its social impacts on local society in rural Bangladesh: a case study



of a village in Tangail district // *Journal of Urban and Regional Studies on Contemporary India*. 2015. Vol. 2. Iss. 1. P. 1–11.

7. Зинкевич-Евстигнеева Т.Д., Грабенко Т.М. Практикум по песочной терапии. СПб.: Речь, 2002. 217 с.

8. Сакович Н.А. Технология игры в песок. Игры на мосту. СПб.: Речь, 2006. 172 с.

9. Борисов Б.А., Егорова Е.Ю., Зайнуллин Р.А. Водоподготовка в производстве пищевых продуктов и напитков. СПб.: Профессия, 2015. 398 с.

10. Сомин В.А., Куртукова Л.В., Комарова Л.Ф. Умягчение подземных вод с использованием нового сорбента на основе бентонитовых глин // *Экология и промышленность России*. 2015. Т. 19. № 1. С. 30–33. <https://doi.org/10.18412/1816-0395-2015-1-30-33>.

11. Рябчиков Б.Е. Современная водоподготовка. М.: ДеЛи плюс, 2013. 679 с.

12. Буравлев В.О., Кондратюк Е.В., Кондратюк А.В., Комарова Л.Ф. Применение новых сорбционных материалов и оборудования для водоподготовки в пищевой промышленности // *Ползуновский вестник*. 2011. № 3/2. С. 188–191.

13. Almojily A., Johnson D., Oatley-Radcliffe D.L., Hilal N. Removal of oil from oil-water emulsion by hybrid coagulation/sand filter as pre-treatment // *Journal of Water Process Engineering*. 2018. Vol. 26. P. 17–27. <https://doi.org/10.1016/j.jwpe.2018.09.004>.

14. Almojily A., Johnson D.J., Mandale S., Hilal N. Optimisation of the removal of oil in water emulsion by using ceramic microfiltration membrane and hybrid coagulation/sand filter-MF // *Journal of Water Process Engineering*. 2019. Vol. 27. P. 15–23. <https://doi.org/10.1016/j.jwpe.2018.11.007>.

15. Cooper C., Burch R. An investigation of catalytic ozonation for the oxidation of halocarbons in drinking water preparation // *Water research*. 1999. Vol. 33. Iss. 18. P. 3695–3700. [https://doi.org/10.1016/S0043-1354\(99\)00091-3](https://doi.org/10.1016/S0043-1354(99)00091-3).

16. Krasnova T.A., Timoshchuk I.V., Dugarjav J., Gorelkina A.K. The choice of sorbent for adsorption extraction of chloroform from drinking water // *Foods and Raw Materials*. 2017. Vol. 5. Iss. 2. P. 189–196. <https://doi.org/10.21603/2308-4057-2017-2-189-196>.

17. Bayram H.N., Uslu A.N., Bakkalbasi A.E., Kiran Yildirim D., Doner Z., Unluer A.T. Geochemical and mineralogical characteristics of beach sand sediments in South-

western Black Sea: an approach to heavy mineral placers // *EGU General Assembly 2020*. 2020. P. 9452. <https://doi.org/10.5194/egusphere-egu2020-9452>.

18. Ревенко А.Г. Рентгеноспектральный флуоресцентный анализ природных материалов. Новосибирск: Наука, 1994. 262 с.

19. Гусева Е.А., Шнырова А.А. Определение физических свойств песков озера Байкал // *Молодежный вестник ИрГТУ*. 2019. Т. 9. № 3. С. 11–13 [Электронный ресурс]. URL: <http://xn--b1agjigi1ai.xn--p1ai/journals/2019/03/articles/02> (15.12.2022).

20. Гусева Е.А., Константинова М.В. Гранулометрический состав песка проб с юго-западного побережья Байкала // *Молодежный Вестник ИрГТУ*. 2019. Т. 9. № 2. С. 7–10 [Электронный ресурс]. URL: <http://xn--b1agjigi1ai.xn--p1ai/journals/2019/02/articles/01> (15.12.2022).

21. Кононов Е.Е. О происхождении песчаных толщ северного Прибайкалья // *Вестник Иркутского государственного технического университета*. 2009. № 4. С. 23–27.

22. Тайсаев Т.Т. Эоловые процессы в Приольхонье и на о. Ольхон (Западное Забайкалье) // *Доклады Академии наук СССР*. 1982. Т. 265. № 4. С. 948–951.

23. Яковлева А.А., Гусева Е.А., До В.Т. Поглоительные свойства песков рекреационных зон юго-западного побережья Байкала по отношению к некоторым агентам // *Биотехнология в интересах экологии и экономики Сибири и Дальнего Востока: материалы V Всерос. науч.-практ. конф. (г. Улан-Удэ, 25–27 июня 2018 г.)*. Улан-Удэ: Изд-во ВСГТУ, 2018. С. 94–100.

24. Смирнов В.Г., Дырдин В.В., Манаков А.Ю., Федорова Н.И., Шикина Р.В., Исмаилов З.Р. Физико-химические и сорбционные свойства образцов природного угля различной степени метоморфизма // *Журнал прикладной химии*. 2019. Т. 92. № 10. С. 1320–1332. <https://doi.org/10.1134/S0044461819100116>.

25. Рощина Т.М., Шония Н.К., Тегина О.Я., Ткаченко О.П., Кустов Л.М. Химические свойства поверхности разновидностей кремнезема // *Журнал физической химии*. 2017. Т. 91. № 2. С. 217–226. <https://doi.org/10.7868/S004445371702025X>.

26. Атякшева Л.Ф., Добрякова И.В., Пилипенко О.С. Адсорбция β-галактозидазы на кремнеземных и алюмосиликатных адсорбентах // *Журнал физической химии*. 2015. Т. 89. № 3. С. 497–501. <https://doi.org/10.7868/S0044453715030036>.

References

1. Chen Y. Construction: limit China's sand mining. *Nature*. 2017;550:457. <https://doi.org/10.1038/550457c>.

2. Al-Harthy A.S., Abdel Halim M., Taha R., Al-Jabri K.S. The properties of concrete made with fine dune sand. *Construction and Building Materials*. 2007;21(8):1803–1808. <https://doi.org/10.1016/j.conbuildmat.2006.05.053>.

3. Gelabert P.A. Environmental effects of sand extraction practices in Puerto Rico. In: *Managing Beach Resources in the Smaller Caribbean Islands: workshop papers*. 21–25 October 1996, Mayagüez. Mayagüez: UPR Sea Grant Printers; 1997, p. 63–68.

4. Bayram A., Önsoy H. Sand and gravel mining impact on the surface water quality: a case study from the city of

Tirebolu (Giresun Province, NE Turkey). *Environmental Earth Science*. 2015;73:1997–2011. <https://doi.org/10.1007/s12665-014-3549-2>.

5. Brunier G., Anthony E.J., Goichot M., Provansal M., Dussouillez P. Recent morphological changes in the Mekong and Bassac river channels, Mekong delta: the marked impact of river-bed mining and implications for delta destablization. *Geomorphology*. 2014;224:177–191. <https://doi.org/10.1016/j.geomorph.2014.07.009>.

6. Khan S., Sugie A. Sand mining and its social impacts on local society in rural Bangladesh: a case study of a village in Tangail district. *Journal of Urban and Regional Studies on Contemporary India*. 2015;2(1):1–11.



7. Zinkevich-Evstigneeva T.D., Grabenko T.M. *Sand therapy workshop*. Saint Petersburg: Rech'; 2002. 217 p. (In Russ.).
8. Sakovich N.A. *Sand game technology. Bridge games*. Saint Petersburg: Rech'; 2006. 172 p. (In Russ.).
9. Borisov B.A., Egorova E.Yu., Zainullin R.A. *Water treatment in food and beverages production*. Saint Petersburg: Professiya; 2015. 398 p. (In Russ.).
10. Somin V.A., Kurtukova L.V., Komarova L.F. Softening underground water using a new sorbent based on bentonite clays. *Ekologiya i promyshlennost' Rossii = Ecology and Industry of Russia*. 2015;19(1):30-33. (In Russ.). <https://doi.org/10.18412/1816-0395-2015-1-30-33>.
11. Ryabchikov B.E. *Modern water treatment*. Moscow: DeLi plyus; 2013. 679 p. (In Russ.).
12. Buravlev V.O., Kondratyuk E.V., Kondratyuk A.V., Komarova L.F. Using new sorption materials and equipment for water treatment in food industry. *Polzunovskiy vestnik*. 2011;3/2:188-191. (In Russ.).
13. Almojjily A., Johnson D., Oatley-Radcliffe D.L., Hilal N. Removal of oil from oil-water emulsion by hybrid coagulation/sand filter as pre-treatment. *Journal of Water Process Engineering*. 2018;26:17–27. <https://doi.org/10.1016/j.jwpe.2018.09.004>.
14. Almojjily A., Johnson D.J., Mandale S., Hilal N. Optimisation of the removal of oil in water emulsion by using ceramic microfiltration membrane and hybrid coagulation/sand filter-MF. *Journal of Water Process Engineering*. 2019;27:15-23. <https://doi.org/10.1016/j.jwpe.2018.11.007>.
15. Cooper C., Burch R. An investigation of catalytic ozonation for the oxidation of halocarbons in drinking water preparation. *Water research*. 1999;33(18):3695-3700. [https://doi.org/10.1016/S0043-1354\(99\)00091-3](https://doi.org/10.1016/S0043-1354(99)00091-3).
16. Krasnova T.A., Timoshchuk I.V., Dugarjav J., Gorelkina A.K. The choice of sorbent for adsorption extraction of chloroform from drinking water. *Foods and Raw Materials*. 2017;5(2):189-196. <https://doi.org/10.21603/2308-4057-2017-2-189-196>.
17. Bayram H.N., Uslu A.N., Bakkalbasi A.E., Kiran Yildirim D., Doner Z., Unluer A.T. Geochemical and mineralogical characteristics of beach sand sediments in South-western Black Sea: an approach to heavy mineral placers. *EGU General Assembly 2020*. 2020:9452. <https://doi.org/10.5194/egusphere-egu2020-9452>.
18. Revenko A.G. *X-ray spectral fluorescence analysis of natural materials*. Novosibirsk: Nauka; 1994. 262 p. (In Russ.).
19. Guseva E.A., Shnyrova A.A. Determination of physical properties of Lake Baikal sands. *Molodezhnyi Vestnik IrGTU = Young Researchers Journal of ISTU*. 2019;9(3):11-13. Available from: <http://xn--b1agjigi1ai.xn--p1ai/journals/2019/03/articles/02> [Accessed 15th December 2022]. (In Russ.).
20. Guseva E.A., Konstantinova M.V. Particle size of sand samples from the south-western coast of Lake Baikal. *Molodezhnyi Vestnik IrGTU = Young Researchers Journal of ISTU*. 2019;9(2):7-10. Available from: <http://xn--b1agjigi1ai.xn--p1ai/journals/2019/02/articles/01> [Accessed 15th December 2022]. (In Russ.).
21. Kononov E.E. On the origin of sandy depths of the northern Transbaikalia. *Vestnik Irkutskogo gosudarstvennogo tekhnicheskogo universiteta = Proceedings of Irkutsk State Technical University*. 2009;4:23-27. (In Russ.).
22. Taisaev T.T. Aeolian processes in the Olkhon region and on Olkhon Island (Western Transbaikalia). *Doklady Akademii nauk SSSR*. 1982;265(4):948-951. (In Russ.).
23. Yakovleva A.A., Guseva E.A., Do V.T. Absorption properties of sands of recreational zones of the south-west Baikal in relation to some agents. In: *Biotehnologiya v interesakh ekologii i ekonomiki Sibiri i Dal'nego Vostoka: materialy V Vseros. nauch.-prakt. konf. = Biotechnology in terms of ecology and economy of Siberia and the Far East: materials of the 5th All-Russian scientific and practical conference*. 25–27 July 2018, Ulan-Ude. Ulan-Ude: East Siberian State University of Technology and Management; 2018, p. 94–100. (In Russ.).
24. Smirnov V.G., Dyrdin V.V., Manakov A.Y., Fedorova N.I., Shikina R.V., Ismagilov Z.R. Physicochemical and sorption properties of natural coal samples with various degrees of metamorphism. *Zhurnal prikladnoi khimii*. 2019;92(10):1320–1332. (In Russ.). <https://doi.org/10.1134/S0044461819100116>.
25. Roshchina T.M., Shoniya N.K., Tegin O.Ya., Tkachenko O.P., Kustov L.M. Physicochemical properties of the surfaces of silica species. *Zhurnal fizicheskoi khimii*. 2017;91(2):217-226. (In Russ.). <https://doi.org/10.7868/S004445371702025X>.
26. Atyaksheva L.F., Dobryakova I.V., Pilipenko O.S. Adsorption of β -galactosidase on silica and aluminosilicate adsorbents. *Zhurnal fizicheskoi khimii*. 2015;89(3):497-501. (In Russ.). <https://doi.org/10.7868/S0044453715030036>.

Информация об авторах / Information about the authors



Яковлева Ариадна Алексеевна,
доктор технических наук, профессор,
профессор кафедры химии и биотехнологии им. В.В. Тутуриной,
Институт высоких технологий,
Иркутский национальный исследовательский технический университет,
г. Иркутск, Россия,
ayakovistu@mail.ru
<https://orcid.org/0000-0002-5747-2864>

Ariadna A. Yakovleva,
Dr. Sci. (Eng.), Professor,
Professor of the Department of Chemistry and Biotechnology named after V.V. Tuturina,
School of High Technologies,
Irkutsk National Research Technical University,



Irkutsk, Russia,
ayakovistu@mail.ru
<https://orcid.org/0000-0002-5747-2864>



Гусева Елена Александровна,
кандидат технических наук, доцент,
доцент кафедры материаловедения, сварочных и аддитивных технологий,
Институт авиамашиностроения и транспорта,
Иркутский национальный исследовательский технический университет,
г. Иркутск, Россия,
el.guseva@rambler.ru
<https://orcid.org/0000-0002-8719-7728>

Elena A. Guseva,
Cand. Sci. (Eng.), Associate Professor,
Associate Professor of the Department of Materials Science,
Welding and Additive Technologies,
Institute of Aircraft Construction, Mechanical Engineering and Transport,
Irkutsk National Research Technical University,
Irkutsk, Russia,
el.guseva@rambler.ru
<https://orcid.org/0000-0002-8719-7728>



Константинова Марина Витальевна,
кандидат химических наук, доцент,
доцент кафедры материаловедения, сварочных и аддитивных технологий,
Институт авиамашиностроения и транспорта,
Иркутский национальный исследовательский технический университет,
г. Иркутск, Россия,
✉ mavikonst@mail.ru
<https://orcid.org/0000-0002-8533-0214>

Marina V. Konstantinova,
Cand. Sci. (Chem.), Associate Professor,
Associate Professor of the Department of Materials Science,
Welding and Additive Technologies,
Institute of Aircraft Construction, Mechanical Engineering and Transport,
Irkutsk National Research Technical University,
Irkutsk, Russia,
✉ mavikonst@mail.ru
<https://orcid.org/0000-0002-8533-0214>

Вклад авторов / Contribution of the authors

Все авторы сделали эквивалентный вклад в подготовку публикации.
The authors contributed equally to this article.

Конфликт интересов / Conflict of interests

Авторы заявляют об отсутствии конфликта интересов.
The authors declare no conflicts of interests.

Все авторы прочитали и одобрили окончательный вариант рукописи.
The final manuscript has been read and approved by all the co-authors.

Информация о статье / Information about the article

Статья поступила в редакцию 17.02.2023; одобрена после рецензирования 02.03.2023; принята к публикации 13.03.2023.

The article was submitted 17.02.2023; approved after reviewing 02.03.2023; accepted for publication 13.03.2023.



ГОРНОПРОМЫШЛЕННАЯ И НЕФТЕГАЗОПРОМЫСЛОВАЯ ГЕОЛОГИЯ, ГЕОФИЗИКА, МАРКШЕЙДЕРСКОЕ ДЕЛО И ГЕОМЕТРИЯ НЕДР

Научная статья

УДК 621.64

<https://doi.org/10.21285/2686-9993-2023-46-1-61-71>



Транспортировка трубопроводного и сжиженного природного газа: сравнительный анализ достоинств и недостатков

В.С. Исмагилова^a, Т.В. Чекушина^b

^{a,b}Российский университет дружбы народов, г. Москва, Россия

Резюме. Энергообеспечение и энергоэффективность на сегодняшний день остаются наиболее важными и актуальными вопросами оживленных дискуссий на международной арене. Цель представленной работы заключается в исследовании современного состояния рынка природного газа. Первостепенными видами транспортируемого углеводородного топлива на торговой площадке в настоящее время являются природный газ, транспортируемый преимущественного по магистральным трубопроводам, и его главный конкурент сжиженный природный газ. В процессе изучения рассматриваемого вопроса был произведен сравнительный анализ преимуществ и недостатков транспортировки трубопроводного и сжиженного природного газа на примере поставок в Европейский союз товарного газа из Российской Федерации и сжиженного природного газа из Соединенных Штатов Америки. Следует отметить, что с сентября 2022 года на неопределенный срок были полностью приостановлены поставки природного газа из России по магистральному газопроводу «Северный поток». В связи с этим на данный момент именно американский сжиженный природный газ становится главной альтернативой трубопроводному газу из России. Между Соединенными Штатами и Европейским союзом сформирована договоренность по поставке 15 млрд м³ сжиженного природного газа в минувшем 2022 году. Тем не менее неоспоримым остается тот факт, что ежедневные гарантированные поставки природного газа являются своевременным и экономически целесообразным источником энергетического топлива. С помощью правила гарантированных достоинств и недостатков авторами данной статьи выявлены наиболее рациональные и выгодные аспекты транспортировки легкого углеводородного топлива. В результате проведенного исследования проанализированы такие показатели, как стоимость поставляемого сырья, затраты, необходимые для транспортировки сопоставляемых вариантов, и количество потерь углеводородного газа в процессе основных технологических операций. Совместно с вышеизложенным изучен вопрос экологической безопасности эксплуатируемых объектов.

Ключевые слова: сжиженный природный газ, трубопроводный газ, правило гарантированных достоинств и недостатков

Для цитирования: Исмагилова В.С., Чекушина Т.В. Транспортировка трубопроводного и сжиженного природного газа: сравнительный анализ достоинств и недостатков // Науки о Земле и недропользование. 2023. Т. 46. № 1. С. 61–71. <https://doi.org/10.21285/2686-9993-2023-46-1-61-71>.

APPLIED MINING AND PETROLEUM FIELD GEOLOGY, GEOPHYSICS, MINE SURVEYING AND SUBSOIL GEOMETRY

Original article

Transportation of pipeline and liquefied natural gas: comparative analysis of pros and cons

Viktoriya S. Ismagilova^a, Tatyana V. Chekushina^b

^{a,b}Peoples' Friendship University of Russia, Moscow, Russia

Abstract. Today energy supply and energy efficiency are still the most important and relevant issues of lively international discussions. The purpose of this paper is to study the current state of the natural gas market. The primary types of transported hydrocarbon fuels currently presented on the trading floor include natural gas predominantly transported through



trunk pipelines, and liquefied natural gas competing with it. The study of this problem involved a comparative analysis of the advantages and disadvantages of liquefied natural gas and pipeline gas transportation for the case of commercial gas shipment from the Russian Federation to the European Union and liquefied natural gas shipment from the United States of America to the European Union. It is important to note that natural gas shipments through the Nord Stream gas pipeline have been completely suspended since September 2022 for an indefinite period of time. As a consequence, it is the American liquefied natural gas that is becoming the main alternative to the pipeline gas from Russia today. An agreement has been formed between the United States and the European Union to supply 15 billion cubic meters of liquefied natural gas in the past 2022. However, the inescapable fact is that daily guaranteed shipment of natural gas is a timely and economically feasible source of energy fuel. Using the rule of guaranteed advantages and disadvantages, the authors identified the most rational and profitable aspects of light hydrocarbon fuel transportation. The conducted study resulted in the analysis of the following indicators: the cost of shipped raw materials, the transportation cost of compared options, and amount of hydrocarbon gas losses during the main technological operations. In addition, the issue of environmental safety of operated facilities was considered.

Keywords: liquefied natural gas, pipeline gas, rule of guaranteed advantages and disadvantages

For citation: Ismagilova V.S., Chekushina T.V. Transportation of pipeline and liquefied natural gas: comparative analysis of pros and cons. *Nauki o Zemle i nedropol'zovanie = Earth sciences and subsoil use*. 2023;46(1):61-71. (In Russ.). <https://doi.org/10.21285/2686-9993-2023-46-1-61-71>.

Введение

Когда человечество подошло к границе нового энергетического кризиса, вновь вспыхнули оживленные дискуссии по поводу альтернативы использования тех или иных видов углеводородного сырья. На сегодняшний день Европейский союз до сих пор пытается разрешить последствия энергетического кризиса 2021 года. Весь мир прекрасно помнит, как зимой того года по всей территории Евросоюза прокатилась волна возмущений, связанных с отсутствием тепла в жилых помещениях. Активы Союза были не готовы к аномальным погодным условиям, и стремительные заявления Европы об отказе от углеводородных полезных ископаемых с переходом на альтернативные источники энергии нанесли ущерб финансовому состоянию крупных импортеров газа. Энергетический кризис в Европе подтверждает высокую зависимость промышленно развитых стран от углеводородных ресурсов, несмотря на попытки нарастить использование возобновляемых источников энергии [1]. В свою очередь, на основе анализа потребления всех видов топлива можно утверждать, что в наибольшей импортной зависимости Европейский союз находится именно от поставок природного газа [2].

В современных реалиях наблюдается положительная динамика спроса на природный газ в Европе. Союз не намерен повторять негативный опыт и взялся стремительно нара-

щивать активы. По данным Ассоциации операторов газовой инфраструктуры Европы (*англ.*: Gas Infrastructure Europe), на газовые сутки 29 августа 2022 года средний уровень заполненности подземных хранилищ газа в Европе достиг намеченных 80 %¹. Тем не менее Евросоюз не намерен останавливаться на достигнутом и в последующие годы ставит задачу по увеличению запасов до 90 %. Как известно, спрос рождает предложения, потому в связи с сокращением транспортировки природного газа из России большая доля поставок перешла к Соединенным Штатам Америки, совместно с этим увеличили свой процент экспорта Катар, Алжир, Норвегия, Азербайджан и Ливия.

Стоит отметить, что заинтересованность в ресурсе проявляет не только Европейский союз – это делают и Скандинавские страны. Имея значительные запасы углеводородного сырья, крупные станы-импортеры нефти и газа решили действовать на перспективу. В то время как Россия и Европа не могут прийти к единому соглашению насчет поставок природного газа, Норвегия заключила контракт с Соединенными Штатами Америки на 15 лет на приобретение 1,75 млн т сжиженного природного газа в год, что составляет около 2,4 млрд м³, для последующей реализации его в Европейский союз. Данная перепродажа не нарушает пункты подписанного договора, так как условия поставки FOB (*англ.*: Free on

¹ В Евросоюзе раскрыли уровень заполнения газохранилищ // Lenta.ru [Электронный ресурс]. URL: <https://lenta.ru/news/2023/01/26/markerrr/> (07.09.2022).



Board) международных правил Инкотермс (англ.: Incoterms, International Commercial Terms) не препятствуют продаже товаров в любую точку мира. Следует признать тот факт, что рост спроса и корректировка предложения по всей цепочке создания стоимости газа способствуют восстановлению мирового углеводородного рынка [3].

В настоящее время Европейский континент проявляет активный интерес к сжиженному природному газу. Данный феномен объясняется тем, что сжиженный природный газ, для которого характерны конкурентоспособные цены, обеспечил переход с угля на газ в энергетическом секторе, стал достойной альтернативой трубопроводному газу, что, в свою очередь, способствовало повышению внутренней добычи и импорта газа в целом [4]. В то же время при ожидаемом росте спроса на сжиженный природный газ в Европе добыча природного газа на ее территории не является многообещающей. На сегодняшний день данный регион является единственным, где высока перспектива снижения добычи природного газа [5]. В мировом производстве газа на долю сжиженного природного газа приходится порядка 40 %. Важно отметить, что мировая тенденция также направлена на увеличение спроса именно на сжиженный природный газ, нежели на его главный конкурент трубопроводный природный газ, спрос на который в разы уменьшился за 2021 год.

Глобализация рынка газа в связи с распространением сжиженного природного газа обострила конкуренцию на рынке Европы [6]. В течение нескольких десятков лет Россия снабжала Европейский союз трубопроводным газом, а с ростом рынка сжиженного природного газа появились новые экспортеры углеводородного топлива. С марта 2022 года между Соединенными Штатами Америки и Европейским союзом сформирована договоренность по поставкам сжиженного природного газа общим объемом 15 млрд м³ в 2022 году с последующим увеличением до 50 млрд м³ в год к 2030 году.

Как отмечают эксперты американо-британ-

ской компании Refinitiv, мировой рынок сжиженного газа характеризуется положительной динамикой: по итогам 2021 года рост составил 5,4 %, а объем потребления в мире установился на уровне своего исторического максимума в размере 382,7 млн т². Ведущие мировые аналитики в нефтегазовой сфере предполагают, что данная тенденция будет только возрастать и к 2035 году увеличится вдвое³. На основе предоставленных международной консалтинговой компанией Wood Machenzie данным компанией «Новатэк» был спрогнозирован и составлен график предполагаемой тенденции увлечения спроса на сжиженный углеводородный газ (рис. 1).

Материалы и методы исследования

Таким образом, сжиженный природный газ стал неотъемлемой частью мировой торговли газом и совместно с этим переходит в разряд одного из ключевых факторов формирования мирового энергетического рынка [7]. Сжиженный природный газ применяют для тех же целей, что и сетевой природный газ: получение электричества, тепловой энергии и промышленного холода, газификация населенных пунктов и промышленных объектов, создание резерва топлива для компенсации пиковых нагрузок, использование в качестве моторного топлива на транспорте, а также сырья для химической промышленности [8, 9]. В то же время существует ряд факторов, которые делают сжиженный природный газ конкурентоспособным товаром по отношению к трубопроводному газу.

Рассмотрение вышеизложенной темы приводит к необходимости сравнения основных видов транспортируемого углеводородного топлива (трубопроводного газа и сжиженного природного газа) и выявления наиболее рационального и экономически выгодного сырья.

В табл. 1 представлены значимые аспекты, необходимые для сопоставления рассматриваемых источников энергии в части их транспортировки.

² Рынок СПГ становится дефицитным // Morvesti.ru [Электронный ресурс]. URL: <http://www.morvesti.ru/themes/1694/94761/> (07.09.2022).

³ Unlocking Arctic potential: expanding our global LNG footprint to 2030 // Novatek.ru [Электронный ресурс]. URL: https://www.novatek.ru/common/upload/doc/IR_June_2020_Investor_Meetings.pdf (07.09.2022).

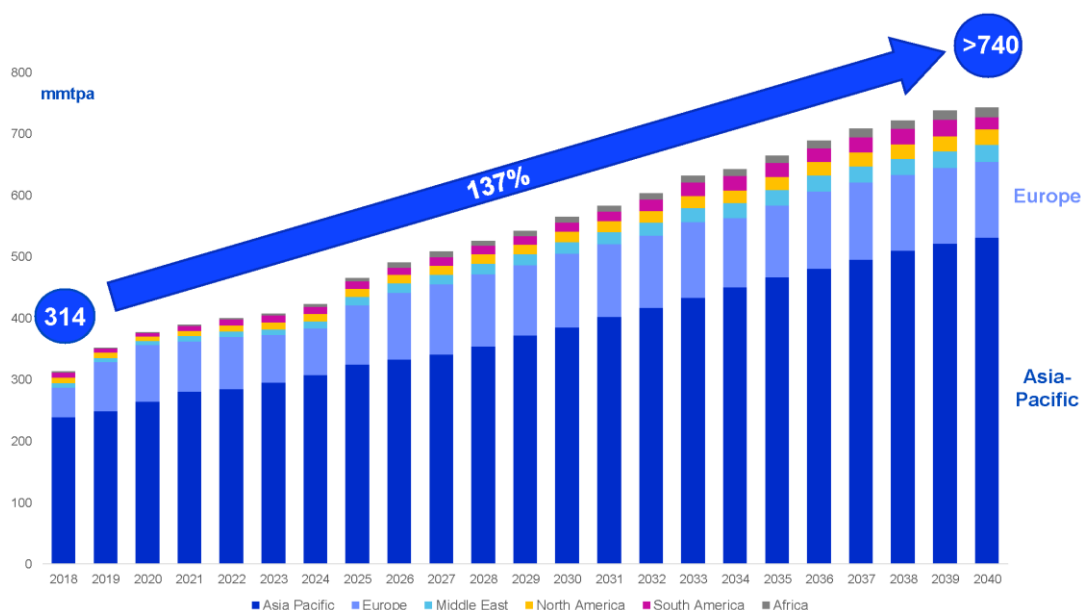


Рис. 1. График прогнозируемого спроса на сжиженный природный газ на мировом рынке⁴
Fig. 1. Graph of forecast liquefied natural gas demand on the world market⁴

Таблица 1. Сравнительный анализ транспортировки трубопроводного и сжиженного природного газа

Table 1. Comparative analysis of pipeline and liquefied natural gas transportation

Вид транспортируемого сырья	Достоинства	Недостатки
Сжиженный природный газ	Более высокая экологичность	Высокая стоимость технологии сжижения газа
	Удобство хранения и транспортировки	
	Возможность массовой транспортировки в любую точку мира	Необходимость строительства терминала по приему и регазификации
	Гибкость и конкурентоспособность на рынке	Вероятность срыва поставок из-за погодных условий
	Отсутствие риска воспламенения и взрывов	Применение дополнительных технологий для сжижения газа перед транспортировкой и разжижения сырья перед подачей потребителю
	Наиболее низкая себестоимость перевозки на дальние расстояния	Значительные потери газа во время процесса сжижения и регазификации
Трубопроводный газ	Высокая скорость доставки больших объемов	Жесткость трассы трубопроводов
	Минимальные потери топлива при перекачке	Крупные материальные затраты на сооружение и эксплуатацию магистрالي
	Бесперебойная и своевременная транспортировка газа к месту сбыта, не зависящая от климатических условий	Возможность возникновения утечек, воспламенения и взрывов
	Небольшие финансовые затраты на перекачку	Потеря энергии газа на преодоление внутреннего трения о стенки труб
	Отсутствие дополнительной переработки перед транспортировкой	Снижение эффективности системы после длительного использования

⁴ Unlocking Arctic potential: expanding our global LNG footprint to 2030 // Novatek.ru [Электронный ресурс]. URL: https://www.novatek.ru/common/upload/doc/IR_June_2020_Investor_Meetings.pdf (07.09.2022).



Главным преимуществом сжиженного углеводородного газа считается легкость его транспортировки и доступность поставки в любую точку независимо от расстояния, климатических условий и рельефа местности в отличие от трубопроводного газа, который доставляется строго по определенному маршруту, соответствующему температурным нормам и географическим условиям. Кроме того, магистральные трубопроводы прокладываются единой дорожкой по построенному пути, в связи с чем отсутствует возможность перенаправить трассу на другой рынок сбыта. В свою очередь, для поставок сжиженного природного газа характерна гибкость и способность адаптировать их под требования потребителя. При этом трассу трубопровода требуется обеспечить необходимой инфраструктурой и оборудованием, в то время как судно танкера уже оснащено технически [10].

Для Европы как для основного приверженца «зеленой экономики» важным преимуществом сжиженного природного газа является то, что он не воспламеняется и не взрывается сам по себе в результате низкой концентрации метана в воздухе, вследствие чего не несет угрозы выброса углекислого газа в атмосферу.

Самым спорным моментом для заполнения активных мощностей хранилищ природного газа любой страны выступает себестоимость поставок углеводородного сырья. Существует мнение, что себестоимость трубопроводного газа значительно дешевле себе-

стоимости поставок сжиженного природного топлива вследствие дорогостоящего процесса приготовления сжиженного газа к транспортировке. Данный феномен обусловлен тем, что для подготовки газа к отправке необходимо использовать достаточно дорогое оборудование, а также сложный технико-технологический процесс, сопровождающийся высокими энергетическими затратами. Совместно с этим к стоимости добавляются значительные капитальные вложения на перевозку танкерами. Для покупателя данный процесс усложняется дополнительными материальными затратами на эксплуатацию пункта приема сжиженного природного газа, включающего в себя терминал по регазификации сырья. В результате этого страны-импортеры задумываются о наиболее экономически выгодных предложениях закупок углеводородного сырья.

Основным поставщиком сжиженного природного газа из Российской Федерации в Европейский союз в 2021 году выступало ПАО «Новатэк». В активах компании разрабатываются крупные газовые залежи Ямало-Ненецкого автономного округа, на долю которого приходится 76,4 % всех текущих запасов газа Российской Федерации (рис. 2). В пределах российского арктического пространства локализовано около 70 % всего арктического природного газа [11, 12]. Самым крупным стратегическим объектом считается интегрированный проект по добыче, сжижению и реализации природного газа «Ямал СПГ».



Рис. 2. Отношение количества запасов природного газа Ямало-Ненецкого округа к общему количеству запасов газа в России
Fig. 2. Yamalo-Nenets District natural gas reserves vs total gas reserves in Russia



Средняя себестоимость сжиженного природного газа Ямало-Ненецкого автономного округа при поставках ПАО «Новатэк» в Европу держалась на уровне 95,7 долл. США за 1000 м³. По данным опубликованных ежегодных отчетных документов, в эту стоимость входит 4,5 долл. за добычу, 26,8 долл. за сжижение газа и 63,8 долл. за доставку топлива потребителю⁵.

В свою очередь, крупнейшим поставщиком трубопроводного газа в Европу в 2021 году по-прежнему оставалась транснациональная энергетическая компания «Газпром», на долю которой приходилось примерно 28–32 % всей емкости рынка природного газа, приблизительно оценивающегося в 400 млрд м³. Средняя экспортная стоимость поставок газа ПАО «Газпром» для Евросоюза при помощи трубопроводного транспорта составила 272,8 долл. США за 1000 м³⁶.

Приведенные факты позволяют сделать вывод, что в 2021 году закупка сжиженного природного газа для европейского рынка экономически оказалась практически в несколько раз выгодней закупки трубного газа.

Следует отметить, что наблюдается снижение стоимости сжижения природного газа по причине масштабного серийного производства оборудования и усовершенствования технологий. Тем не менее основные затраты в себестоимости сжиженного природного газа приходятся именно на доставку сырья. Вопрос транспортировки сжиженного природного газа активно изучается как отечественными, так и зарубежными учеными [13–17]. В конце августа 2022 года американская деловая газета The Wall Street Journal опубликовала новость о резком скачке цен на сжиженный природный газ и стоимость его перевозки, связанном с неожиданным увеличением спроса на танкеры. Повышенный интерес к грузовым самоходным судам обуславливается

самым высоким уровнем спроса на сжиженный природный газ за последние несколько лет, вызванным рекордными аномальными погодными условиями в Европе и Азии. Стоимость фрахта выросла совместно со стоимостью заказа новых танкеров. Годом ранее готовый танкер для сжиженного природного газа обходился заказчику в сумму, равную 190 млн долл. США, тогда как в августе 2022 года рассматриваемая величина составила 240 млн долл.⁷.

Рассмотренные преимущества и недостатки являются субъективными, данный вопрос требует более объективного рассмотрения всех параметров для выявления наиболее рационального и выгодного способа транспортировки газа. Для этого воспользуемся правилом гарантированных достоинств и недостатков.

Результаты исследования и их обсуждение

В качестве исходных данных возьмем условия, актуальные на август – сентябрь 2022 года. Главенствующую роль экспортера сжиженного углеводородного газа тогда выполняли Соединенные Штаты Америки, которые в августе 2022 года поставили в Европу 6,25 млн т топлива. Несмотря на резкое снижение поставок природного газа из России в Германию по «Северному потоку – 1», до сентября 2022 года ПАО «Газпром», как и прежде, оставалось основным поставщиком углеводородного топлива по магистральному трубопроводу. Для сравнения подберем наиболее важные параметры торгово-экономических отношений на бирже энергетического сырья. Список вариантов и рассматриваемые критерии оценки систематизированы в табл. 2.

Каждый из представленных вариантов оценивается по выбранным критериям, и с

⁵ ПАО «Новатэк»: Анализ и оценка руководством финансового положения и результатов деятельности за три месяца, закончившихся 30 сентября 2021 г. // Novatek.ru [Электронный ресурс]. URL: [https://www.novatek.ru/common/upload/doc/MDA_3Q_2021_\(Rus\)_final.pdf](https://www.novatek.ru/common/upload/doc/MDA_3Q_2021_(Rus)_final.pdf) (07.09.2022).

⁶ Годовой отчет ПАО «Газпром» за 2021 год // Gazprom.ru [Электронный ресурс]. URL: <https://www.gazprom.ru/f/posts/57/982072/gazprom-annual-report-2021-ru.pdf> (07.09.2022).

⁷ WSJ сообщает, что на мировом рынке началась нешуточная борьба за СПГ-танкеры // Fbm.ru [Электронный ресурс]. URL: <https://fbm.ru/novosti/business/ws-j-soobshhaet-cto-na-mirovom-rynke-nachalas-neshutochnaja-borba-zaspg-tankery.html> (07.09.2022).



Таблица 2. Исходные данные для сравнения сжиженного природного газа и трубопроводного газа^{8,9} [18, 19]

Table 2. Input data for the comparison of liquefied natural gas and pipeline gas^{8,9} [18, 19]

Критерий	Сжиженный природный газ	Трубопроводный газ
Стоимость 1000 м ³ топлива	2620 долл. США (по состоянию на 26 августа 2022 г.)	512 долл. США (по состоянию на 7 сентября 2022 г.)
Затраты на доставку топлива	240 млн долл. США за один рейс танкера, вмещающего газ объемом 260 тыс. м ³	68,83 руб. за 1 тыс. м ³ газа на 100 км
Количество потерь при транспортировке	0,1–0,15 %	0,2–0,3 %
Экологическая безопасность при транспортировке	2 балла	1 балл

помощью прямой (1) или обратной (2) пропорции¹⁰ вычисляются баллы, необходимые для анализа-сравнения. Для рационального вычисления зададим диапазон значений эталонной шкалы от 1 до 10, которая в вышеупомянутых формулах принимает значения *maxB* и *minB* соответственно.

$$x_i = \frac{(A - \min)(\max B - \min B)}{\max - \min} + \min B, \quad (1)$$

$$x_i = \frac{(\max - A)(\max B - \min B)}{\max - \min} + \min B. \quad (2)$$

Параметр *A* подразумевает числовое значение представленного варианта по анализируемому критерию. С целью объективного анализа подбираются наиболее приближенные к параметру *A* значения максимума и минимума.

1. Стоимость спотовых партий сжиженного природного газа из Соединенных Штатов Америки, согласно условиям FOB, на начало газовых суток 26 августа 2022 года составила 73,35 долл. за MMBtu, что в переводе составляет 2620 долл. за 1000 м³. Применительно к укрепившемуся на тот момент курсу рубля к доллару цена 1 м³ российского трубопроводного газа установилась на уровне 512 долл. США. Вследствие этого максимальное значение зададим равным 2700, а минимальное – 500. На основании того, что меньшая стои-

мость выгодней для импортера, рассматривается обратная пропорция:

$$x_{СПГ} = \frac{(2700 - 2620)(10 - 1)}{2700 - 500} + 1 = 1,33,$$

$$x_{ТГ} = \frac{(2700 - 512)(10 - 1)}{2700 - 500} + 1 = 9,95.$$

2. По причине повышенного спроса на танкеры для сжиженного природного газа стоимость одного фрахта готового танкера по маршруту «Соединенные Штаты Америки – Германия» составляла 240 млн долл. Современный танкер для транспортировки сжиженного природного газа вмещает объем до 260 тыс. м³ сжиженного газа, из чего может быть получено приблизительно 160 млн м³ природного газа. Между тем стоит отметить, что требуются затраты на прием, регазификацию и транспортировку углеводородного топлива до емкостей для хранения. Эксплуатация нитки «Северный поток – 1» обходилась в 68,83 руб. за 1000 м³ газа на 100 км¹¹. Длина трубопровода насчитывает 1224 км, примерная суточная величина поставки газа на рассматриваемый период времени оставалась на уровне 200 млн в сутки, в результате чего получаем величину, равную 281 млн долл. США. Значение максимума определим как 290, значение минимума – 230. Предпочтение отдаем наименьшим затратам на транспортировку, в ре-

⁸ Годовой отчет ПАО «Газпром» за 2021 год // Gazprom.ru [Электронный ресурс]. URL: <https://www.gazprom.ru/f/posts/57/982072/gazprom-annual-report-2021-ru.pdf> (07.09.2022).

⁹ ГОСТ 32569-2013. Трубопроводы технологические стальные. Требования к устройству и эксплуатации на взрывопожароопасных и химически опасных производствах // Docs.cntd.ru [Электронный ресурс]. URL: <https://docs.cntd.ru/document/1200111138> (07.09.2022).

¹⁰ Романов А.Н., Одинцов Б.Е. Советующие информационные системы в экономике: учебн. пособие. М.: ИНФРА-М, 2016. 485 с.

¹¹ Годовой отчет ПАО «Газпром» за 2021 год // Gazprom.ru [Электронный ресурс]. URL: <https://www.gazprom.ru/f/posts/57/982072/gazprom-annual-report-2021-ru.pdf> (07.09.2022).



зультате чего вычисления проводим по обратной пропорции:

$$x_{\text{СПГ}} = \frac{(290-240)(10-1)}{290-230} + 1 = 8,5,$$

$$x_{\text{ТГ}} = \frac{(290-281)(10-1)}{290-230} + 1 = 2,35.$$

3. Анализ эффективности транспортных систем невозможно производить без комплексного представления объемов потерь углеводородного газа в процессе основных технологических операций. В результате многочисленных экспериментов было установлено, что при перевозке морскими судами потери сжиженного природного газа варьируют в диапазоне от 0,1 до 0,15 % в зависимости от вместимости танкера [18]. Потери природного газа при транспортировке магистральными трубопроводами в среднем составляют 0,2–0,3 % от перекачиваемого объема. Значение максимума подберем как 0,3, а значение минимума – 0,1. Применяем обратную пропорцию, так как необходимо сократить потери энергетического сырья при его транспортировке:

$$x_{\text{СПГ}} = \frac{(0,3-0,125)(10-1)}{0,3-0,1} + 1 = 8,875.$$

$$x_{\text{ТГ}} = \frac{(0,3-0,25)(10-1)}{0,3-0,1} + 1 = 3,25.$$

4. Охрана окружающей среды стала чрезвычайно важным параметром конкурентоспособности представляемых товаров и услуг. Экологическая безопасность эксплуатируемого объекта оценивается с помощью пятибалльной системы, регламентируемой межгосударственным стандартом ГОСТ 32569-2013¹². Минимальному уровню воздействия на окружающую среду присваивается максимальный балл, то есть чем более экологиче-

ски безопасен рассматриваемый объект, тем выше значение этой оценки. В связи с этим значение максимальной величины примем равным 5, а минимальной – 1. Чем больше балл, тем лучше – используем прямую пропорцию:

$$x_{\text{СПГ}} = \frac{(2-1)(10-1)}{5-1} + 1 = 3,5,$$

$$x_{\text{ТГ}} = \frac{(1-1)(10-1)}{5-1} + 1 = 1.$$

Полученные баллы округляем в большую сторону, попарно сравниваем каждый из рассчитанных параметров и заносим в таблицу результатов (табл. 3).

С помощью суммирования определяем вариант, набравший большее количество баллов, который и является приоритетным:

$$\sum x_{\text{СПГ}} = 7 + 6 + 3 = 16,$$

$$\sum x_{\text{ТГ}} = 9.$$

Заключение

Проведенный согласно правилу гарантированных достоинств и недостатков анализ, а также экономико-политическая ситуация, сложившаяся на сегодняшний день, позволяют прийти к выводу, что в настоящих условиях при бесперебойных доставках по установленному тарифу американский сжиженный природный газ сможет заменить лишь часть поставляемого российского газа. Неоспоримым остается факт того, что ежедневные гарантированные поставки готового товарного газа, не требующего дополнительных технологий для его отгрузки, применения и хранения, являются своевременным и экономически целесообразным источником энергетического топлива. Тем не менее в данный период именно

Таблица 3. Балльные оценки, полученные в результате анализа сжиженного природного и трубопроводного газа

Table 3. Score estimations obtained from the comparison of liquefied natural gas and natural gas

Критерий	Сжиженный природный газ	Трубопроводный газ
Стоимость за 1000 м ³ топлива	0	9
Затраты на доставку топлива	7	0
Количество потерь при транспортировке	6	0
Экологическая безопасность при транспортировке	3	0

¹² ГОСТ 32569-2013. Трубопроводы технологические стальные. Требования к устройству и эксплуатации на взрывопожароопасных и химически опасных производствах // Docs.cntd.ru [Электронный ресурс]. URL: <https://docs.cntd.ru/document/1200111138> (07.09.2022).



сжиженный природный газ из Соединенных Штатов Америки остается главной альтернативой трубопроводному газу из Российской Федерации. При этом, несмотря на полную остановку ниток «Северный поток – 1» и «Северный поток – 2», Европа значительно увеличивает закупку российского сжиженного природного газа, производимого и поставляемого компанией «Новатэк». Основными рынками потребления экспортируемого газа стали такие страны, как Франция, Испания и Нидерланды. С начала 2022 года экспорт российского сжиженного природного газа в Евро-

пейский союз увеличился в полтора раза и составил 15 млрд м³. Важным фактором является то, что рынок природного газа Соединенных Штатов Америки отличается повышенной гибкостью, а действующие на нем компании постоянно нацелены на технологические и бизнес-инновации, что позволяет им существенно расширить свою нишу в глобальной торговле сжиженным углеводородным сырьем. Американский сжиженный природный газ имеет хорошие шансы как на новых рынках, так и в конкуренции за старые рынки сжиженного природного газа [20].

Список источников

1. Узнародов И.М. Энергетический кризис в Европе и перспективы низкоуглеродной экономики // Известия высших учебных заведений. Северо-Кавказский регион. Общественные науки. 2022. №2. С. 95–101. <https://doi.org/10.18522/2687-0770-2022-2-95-101>.
2. Шуранова А.А., Петрунин Ю.Ю. Энергетический кризис 2021–2022 гг. в отношениях России и Европейского союза // Государственное управление. Электронный вестник. 2022. № 90. С. 74–89. <https://doi.org/10.24412/2070-1381-2022-90-74-89>.
3. Лазник А.А., Жарков Р.Д., Родыгина Н.Ю., Мусихин В.И. Состояние рынка природного газа в условиях пандемии COVID-19 и нестабильности спроса // Российский внешнеэкономический вестник. 2021. № 5. С. 101–115. <https://doi.org/10.24412/2072-8042-2021-5-101-115>.
4. Шавина Е.В. Тенденции развития мировой газовой отрасли в современных условиях // Геоэкономика энергетики. 2020. Т. 12. № 4. С. 40–58. https://doi.org/10.48137/2687-0703_2020_12_4_40.
5. Щеголькова А.А. Экономическая конъюнктура на глобальном рынке сжиженного природного газа // Экономика и бизнес: теория и практика. 2019. № 6-2. С. 177–184. <https://doi.org/10.24411/2411-0450-2019-10888>.
6. Гедич Т.Г. Конкуренция СПГ и российского трубопроводного газа на рынке Европы // Архивариус. 2016. № 9. С. 138–143.
7. Кириллов Н.Г., Белозерова Т.Б., Лазарев А.Н., Ярыгин Ю.Н., Дроздов Ю.В. Сжиженный природный газ: анализ мирового рынка и перспективы отечественного производства // Газохимия. 2010. № 6. С. 23–29.
8. Кириллов Н.Г. СПГ – универсальное энергетическое топливо XXI века // Нефть, газ & СПГ. 2004. № 2. С. 39–43.
9. Карасевич А.М., Ярыгин Ю.Н., Дроздов Ю.В. Расширение источников поставок газа при газификации регионов России // Газовая промышленность. 2009. № S (640). С. 23–25.
10. Сахо К.Н. Разработка научного подхода к решению задач проектирования, изготовления и монтажа судовых трубопроводов // Вестник Астраханского государственного технического университета. 2005. № 2. С. 145–152.
11. Козьменко С.Ю., Маслобоев В.А., Матвишин Д.А. Обоснование экономического преимущества морской транспортировки арктического природного газа в виде СПГ // Записки Горного института. 2018. Т. 233. С. 554–560. <https://doi.org/10.31897/PMI.2018.5.554>.
12. Швеи Н.Н., Береснева П.В. Нефтегазовые ресурсы Арктики: правовой статус, оценка запасов и экономическая целесообразность их разработки // Вестник МГИМО-Университета. 2014. № 4. С. 60–67. <https://doi.org/10.24833/2071-8160-2014-4-37-60-67>.
13. Балабуха А.В., Мещук А.А., Дербичев В.С., Роман К.С., Баженов П.А., Болдырев К.А. Оптимизация хранения и транспортировки сжиженного природного газа на транспортном судне // Вестник Евразийской науки. 2019. Т. 11. № 4 [Электронный ресурс]. URL: <https://esj.today/PDF/12SAVN419.pdf> (07.09.2022).
14. Хорошев В.Г., Попов Л.Н., Гатин Р.И. Перспективы использования альтернативных видов топлива в судовых энергетических установках // Труды Крыловского государственного научного центра. 2019. № 4. С. 194–202. <https://doi.org/10.24937/2542-2324-2019-4-390-194-202>.
15. Павловский В.А., Реуцкий А.С. Обоснование характеристик грузовой системы бункеровщиков сжиженного природного газа // Труды Крыловского государственного научного центра. 2018. Спец. вып. 2. С. 191–199. <https://doi.org/10.24937/2542-2324-2018-2-S-I-191-199>.
16. Дорожкин В.Ю. Разработка и внедрение систем технологий сжижения природного газа – движение к ресурсному и энергетическому обеспечению будущего // Транспорт и хранение нефтепродуктов и углеводородного сырья. 2021. № 1. С. 51–57. <https://doi.org/10.24412/0131-4270-2021-1-51-57>.
17. Павловский В.А., Богданов А.В. Производство, хранение и транспортировка сжиженных природных газов // Труды Крыловского государственного научного центра. 2021. № 1. С. 358–360. <https://doi.org/10.24937/2542-2324-2020-1-S-I-358-360>.
18. Таровик О.В., Реуцкий А.С., Топаж А.Г. Оценка потерь бункерного СПГ от испарения // Мир транспорта. 2020. Т. 18. № 3. С. 84–106. <https://doi.org/10.30932/>



1992-3252-2020-18-84-106.

19. Тухбатуллин Ф.Г., Семейченков Д.С. Сокращение потерь природного газа в системе газораспределения за счет применения балансовых карт // Территория «Нефтегаз». 2018. № 1-2. С. 12–20.

20. Жуков С.В., Масленников А.О., Синицин М.В. Факторы глобальной конкурентоспособности американского СПГ // Контуры глобальных трансформаций: политика, экономика, право. 2019. Т. 12. № 6. С. 43–70. <https://doi.org/10.23932/2542-0240-2019-12-6-3>.

References

1. Uznarodov I.M. The energy crisis in Europe and the prospects for a low-carbon economy. *Izvestiya vysshikh uchebnykh zavedenii. Severo-Kavkazskii region. Obshchestvennye nauki = Bulletin of higher education institutes. North Caucasus region. Social sciences*. 2022;2:95-101. (In Russ.). <https://doi.org/10.18522/2687-0770-2022-2-95-101>.

2. Shuranova A.A., Petrunin Yu.Yu. The 2021–2022 energy crisis in relations between Russia and European Union. *Gosudarstvennoe upravlenie. Elektronnyi vestnik = Public Administration. E-journal (Russia)*. 2022;90:74-89. (In Russ.). <https://doi.org/10.24412/2070-1381-2022-90-74-89>.

3. Laznik A.A., Zharkov R.D., Rodygina N.Yu., Musikhin V.I. Natural gas market under COVID-19 pandemic and unstable demand. *Rossiiskii vneshneekonomicheskii vestnik = Russian Foreign Economic Journal*. 2021;5:101-115. (In Russ.). <https://doi.org/10.24412/2072-8042-2021-5-101-115>.

4. Shavina E.V. World gas industry development trends in modern conditions. *Geoekonomika energetiki = Geoeconomics of Energetics*. 2020;12(4):40-58. (In Russ.). https://doi.org/10.48137/2687-0703_2020_12_4_40.

5. Shchegolkova A.A. Economic conditions in the global market for liquefied natural gas. *Ekonomika i biznes: teoriya i praktika = Journal of Economy and Business*. 2019;6-2:177-184. (In Russ.). <https://doi.org/10.24411/2411-0450-2019-10888>.

6. Gedich T.G. Competition of LNG and Russian pipeline gas in the European market. *Arkhiarius*. 2016;9:138-143. (In Russ.).

7. Kirillov N.G., Belozeroва T.B., Lazarev A.N., Yarygin Yu.N., Drozdov Yu.V. Liquefied natural gas: analysis of the world market and prospects for domestic production. *Gazokhimiya*. 2010;6:23-29. (In Russ.).

8. Kirillov N.G. Liquefied natural gas as a universal energy fuel of the 21st century. *Neft', gaz & SRP = Oil, gaz & PSA*. 2004;2:39-43. (In Russ.).

9. Karasevich A.M., Yarygin Yu.N., Drozdov Yu.V. Expansion of gas supply sources during gasification of Russian regions. *Gazovaya promyshlennost' = Gas Industry*. 2009;S(640):23-25. (In Russ.).

10. Sakhno K.N. Working out scientific approach for solving engineering problems, producing and assembling vessel pipelines. *Vestnik Astrakhanskogo gosudarstvennogo tekhnicheskogo universiteta = Vestnik of Astrakhan state technical university*. 2005;2:145-152. (In Russ.).

11. Koz'menko S.Y., Masloboev V.A., Matviishin D.A. Justification of economic benefits of arctic LNG transportation by sea. *Zapiski Gornogo instituta = Journal of Mining Institute*. 2018;233:554-560. (In Russ.). <https://doi.org/10.31897/PMI.2018.5.554>.

31897/PMI.2018.5.554.

12. Shvets N.N., Beresneva P.V. Oil and gas in Arctic: legal status, reserves estimate and economic feasibility study. *Vestnik MGIMO-Universiteta = MGIMO Review of International Relations*. 2014;4:60-67. (In Russ.). <https://doi.org/10.24833/2071-8160-2014-4-37-60-67>.

13. Balabukha A.V., Meshchuk A.A., Derbichev V.S., Roman K.S., Bazhenov P.A., Boldyrev K.A. Optimization of storage and transportation of liquefied natural gas on a transport vessel. *Vestnik Evraziiskoi nauki = The Eurasian Scientific Journal*. 2019;11(4). Available from: <https://esj.today/PDF/12SAVN419.pdf> [Accessed 7th September 2022]. (In Russ.).

14. Khoroshev V.G., Popov L.N., Gatin R.I. Prospects of alternative fuels for marine power plants. *Trudy Krylovskogo gosudarstvennogo nauchnogo tsentra = Transactions of the Krylov State Research Centre*. 2019;4:194-202. (In Russ.). <https://doi.org/10.24937/2542-2324-2019-4-390-194-202>.

15. Pavlovsky V.A., Reutsky A.S. LNG bunker handling system verification. *Trudy Krylovskogo gosudarstvennogo nauchnogo tsentra = Transactions of the Krylov State Research Centre*. 2018;2:191-199. (In Russ.). <https://doi.org/10.24937/2542-2324-2018-2-S-I-191-199>.

16. Dorozhkin V.Yu. LNG technology systems development and implementation as a movement to the resources and energy supplied future. *Transport i khranenie nefteproduktov i uglevodorodnogo syr'ya = Transport and Storage of Oil Products and Hydrocarbons*. 2021;1:51-57. (In Russ.). <https://doi.org/10.24412/0131-4270-2021-1-51-57>.

17. Pavlovsky V.A., Bogdanov A.V. Production, storage and transportation of liquefied natural gases. *Trudy Krylovskogo gosudarstvennogo nauchnogo tsentra = Transactions of the Krylov State Research Centre*. 2021;1:358-360. (In Russ.). <https://doi.org/10.24937/2542-2324-2020-1-S-I-358-360>.

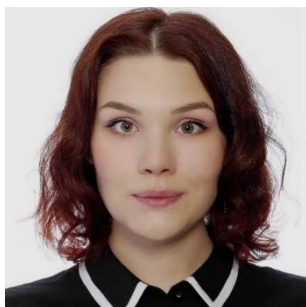
18. Tarovik O.V., Reutsky A.S., Topazh A.G. Estimation of Evaporation Losses of Bunker LNG. *Mir transporta = World of Transport and Transportation*. 2020;18(3):84-106. (In Russ.). <https://doi.org/10.30932/1992-3252-2020-18-84-106>.

19. Tuxhatullin F.G., Semeychenkov D.S. Reduction of natural gas losses in the gas distribution system due to the use of balance cards. *Territoriya "Neftegaz" = Oil and Gas Territory*. 2018;1-2:12-20. (In Russ.).

20. Zhukov S.V., Maslennikov A.O., Sinitsyn M.V. Factors of global competitiveness of American LNG. *Kontury global'nykh transformatsii: politika, ekonomika, parvo = Global Infrastructure in the Digital Age*. 2019;12(6):43-70. (In Russ.). <https://doi.org/10.23932/2542-0240-2019-12-6-3>.



Информация об авторах / Information about the authors



Исмагилова Виктория Салимовна,
студентка,
Российский университет дружбы народов,
г. Москва, Россия,
✉ viktoriya_ismagilova_8@mail.ru
Viktoriya S. Ismagilova,
Student,
Peoples' Friendship University of Russia,
Moscow, Russia,
✉ viktoriya_ismagilova_8@mail.ru



Чекушина Татьяна Владимировна,
кандидат технических наук, доцент,
доцент Департамента недропользования
и нефтегазового дела Инженерной академии,
Российский университет дружбы народов,
г. Москва, Россия,
chekushina_tv@pfur.ru
<https://orcid.org/0000-0001-9261-1105>
Tatyana V. Chekushina,
Cand. Sci. (Eng.), Associate Professor,
Associate Professor of the Department of Subsoil Use
and Oil and Gas Business of the Engineering Academy,
Peoples' Friendship University of Russia,
Moscow, Russia,
chekushina_tv@pfur.ru
<https://orcid.org/0000-0001-9261-1105>

Вклад авторов / Contribution of the authors

Все авторы сделали эквивалентный вклад в подготовку публикации.
The authors contributed equally to this article.

Конфликт интересов / Conflict of interests

Авторы заявляют об отсутствии конфликта интересов.
The authors declare no conflicts of interests.

Все авторы прочитали и одобрили окончательный вариант рукописи.
The final manuscript has been read and approved by all the co-authors.

Информация о статье / Information about the article

Статья поступила в редакцию 01.11.2022; одобрена после рецензирования 22.11.2022; принята к публикации 09.02.2023.

The article was submitted 01.11.2022; approved after reviewing 22.11.2022; accepted for publication 09.02.2023.



Научная статья

УДК 622.118.17

<https://doi.org/10.21285/2686-9993-2023-46-1-72-83>

Пути снижения остаточных сварочных напряжений в металлоконструкциях карьерных экскаваторов

А.П. Макаров^a, В.А. Храмовских^{ba}, К.А. Непомнящих^c^{a-c}Иркутский национальный исследовательский технический университет, г. Иркутск, Россия

Резюме. Остаточные напряжения в металлоконструкциях карьерного оборудования, вызванные сваркой, возникают из-за неравномерного одновременного нагрева и охлаждения локальных участков конструкций, переменных скоростей охлаждения в разных областях сварного шва, а также деформаций, связанных с металлургическими фазовыми преобразованиями. Остаточное напряжение в сварном соединении может существенно увеличить внешнюю нагрузку и привести к разрушению конструкции. Исследования по расчету, измерению и снижению остаточных напряжений при сварке являются важными вопросами при прогнозировании ресурса узлов металлоконструкций горных машин и оборудования. Точная количественная оценка остаточных напряжений в сварных изделиях, включая ремонтные швы, а также поиск основных принципов, лежащих в основе методов устранения остаточных деформаций, представляет значительный практический интерес, актуальный и для авторов данного исследования. В ходе работы нами была обобщена информация по последним исследованиям в области оценки и измерения остаточных напряжений, вызванных электрогазосварочным воздействием. Предложено использование в исследовании различных техник и аналитических методов для количественной оценки остаточных напряжений сварного шва на основе механики разрушения, что позволяет на ранних стадиях предпринимать упреждающие меры по снижению затрат на ремонт и техническое обслуживание сварных металлоконструкций карьерных экскаваторов. В результате проведенных работ сформированы предложения для снижения остаточных сварочных напряжений в металлоконструкциях карьерных экскаваторов.

Ключевые слова: остаточное напряжение и деформация, электрогазовая сварка, конечный элементный анализ

Для цитирования: Макаров А.П., Храмовских В.А., Непомнящих К.А. Пути снижения остаточных сварочных напряжений в металлоконструкциях карьерных экскаваторов // Науки о Земле и недропользование. 2023. Т. 46. № 1. С. 72–83. <https://doi.org/10.21285/2686-9993-2023-46-1-72-83>.

Original article

Methods to reduce residual welding stresses in mining excavator metal structures

Anatoly P. Makarov^a, Vitaly A. Khramovskikh^{ba}, Kirill A. Nepomnyashchikh^c^{a-c}Irkutsk National Research Technical University, Irkutsk, Russia

Abstract. Residual stresses in metal structures of mining machinery caused by welding occur due to simultaneous uneven heating and cooling of local sections of structures, variable cooling rates in the different areas of the weld and deformations caused by metallurgical phase transformations. Residual stress in the welded joint can significantly increase the external load that can lead to structural failure. Research on the calculation, measurement and relief of residual stresses under welding is an important issue when predicting the service life of metal structure units of mining machinery and equipment. An accurate quantitative estimation of residual stresses in welded products, repair welds included, as well as the search for the fundamental principles of the elimination methods of residual deformations are of considerable practical interest, which is relevant for the authors of this paper. The study involved a general review of the latest researches in the field of estimation and measurement of residual stresses caused by electrogas welding. It has been proposed to use various techniques and analytical methods for quantitative estimation of welded joint residual stresses on the basis of fracture mechanics, which enabled to take preventative measures at early stages to reduce the cost of repair and maintenance of welded metal structures of mining excavators. The conducted study resulted in formulating the proposals on relief of residual welding stresses in the metal structures of mining excavators.

Keywords: residual stress and deformation, electrogas welding, finite element analysis

© Макаров А.П., Храмовских В.А., Непомнящих К.А., 2023



For citation: Makarov A.P., Khramovskikh V.A., Nepomnyashchikh K.A. Methods to reduce residual welding stresses in mining excavator metal structures. *Nauki o Zemle i nedropol'zovanie* = *Earth sciences and subsoil use*. 2023;46(1):72-83. (In Russ.). <https://doi.org/10.21285/2686-9993-2023-46-1-72-83>.

Введение

Остаточные напряжения при сварке возникают из-за несоответствия между различными деталями, областями внутри одной и той же детали, возникающими из-за неравномерной термической деформации, а также деформаций, возникающих в результате затвердевания и фазовых превращений в твердом состоянии. Во время сварки область вокруг сварочной ванны неизбежно связана с растягивающими остаточными напряжениями в направлении сварки, а растягивающие напряжения уравниваются сжимающими напряжениями дальше от линии сварки. Остаточное напряжение растяжения, вызванное сваркой, способствует хрупкому разрушению, деформации при изгибе и коррозионному растрескиванию металлоконструкций под напряжением и снижает усталостный ресурс сварных конструкций в процессе эксплуатации. В связи с этим при расчетах на статическую и динамическую прочность и долговечность металлоконструкций остаточные напряжения следует учитывать наряду с напряжениями от внешних нагрузок.

Основным направлением исследований остаточных напряжений, вызванных сваркой, является разработка математических моделей для оценки и экспериментальных методов измерения, а также снижения остаточных напряжений для различных геометрий соединений и условий сварки. Поиск способов устранения негативного влияния остаточных напряжений может рассматриваться на разных стадиях жизненного цикла работы металлоконструкций карьерных экскаваторов от стадии проектирования и выбора конструкционных материалов через длительный процесс эксплуатации до ремонтного воздействия. Область данного исследования заключается в поиске эффективных методов снятия остаточных напряжений на стадиях эксплуатации и ремонта.

Материалы и методы исследования

Оценка остаточных напряжений, вызванных сваркой, на основе аналитических расче-

тов температурного поля приводит исследователей к ограниченному успеху. Компьютерные численные модели привлекают значительное внимание, поскольку с их помощью можно учитывать реалистичные граничные условия, свойства материала, зависящие от температуры, а также сложную геометрию соединения. Тем не менее в ходе применения численных моделей исследователи сталкиваются с определенными проблемами: для точной оценки температурного поля в сварном шве необходимы точные трехмерные модели и анализ, учитывающий разные режимы теплопередачи, такие расчеты, как правило, требуют больших вычислительных затрат; изменение термомеханических деформаций по мере затвердевания и охлаждения металла в сварочной ванне зависит от переходного температурного поля и механических ограничений, связанных с геометрией соединения, которые слишком сложны для рассмотрения; модели, которые могут точно описать термоупругопластическую реакцию материалов на напряжение, деформацию и учет влияния твердофазного фазового превращения, мало доступны для многих материалов [1–5].

Анализ методом конечных элементов, пример использования которого изображен на рис. 1, является мощным инструментом. Данный метод можно использовать для точного определения остаточного напряжения и деформации сварных соединений, однако он требует значительных вычислительных затрат и времени, что затрудняет его применение в практических проектах. В связи с этим некоторыми исследователями были предприняты попытки объединить различные методы анализа для повышения эффективности вычислений с использованием искусственных нейронных сетей, которые признаны одним из самых популярных и перспективных методов машинного обучения, преодолевающим ограниченность и неэффективность математических моделей [6–10].

Такого рода системы для прогнозирования остаточного напряжения и деформации сварки обладают рядом преимуществ и способны моделировать, оптимизировать и прогнозировать

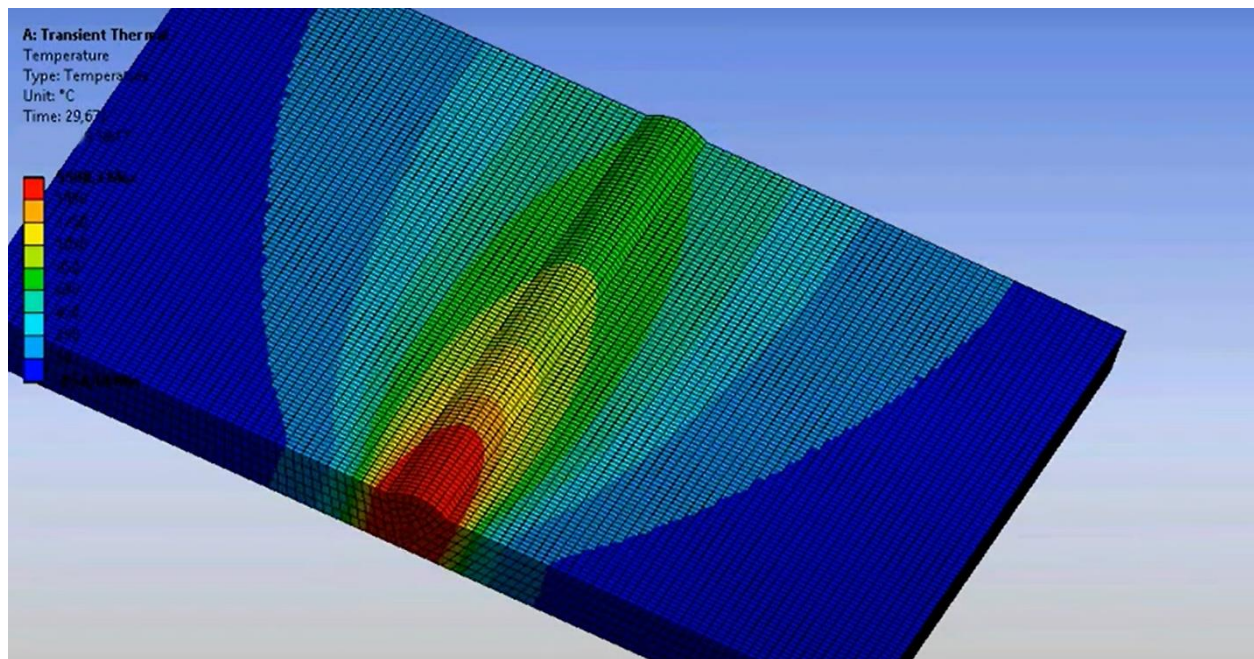


Рис. 1. Моделирование теплового процесса при сварке стыкового соединения в программном комплексе ANSYS, базирующемся на методе конечных элементов
Fig. 1. Modeling of thermal process under butt joint welding in the ANSYS software package based on the finite element method

сложные системы под воздействием множества параметров, что особенно подходит для сварочного процесса с присущей ему сильной нелинейностью. Модель искусственной нейронной сети для прогнозирования остаточных напряжений и деформаций, полученных при электрогазовой сварке, использует ряд входных данных. Некоторые из них, такие как сварочный ток, тип охлаждения и сварочный материал, влияют на тепловое поле, в то время как толщина металла, угол разделки кромок, зазор и сварочный материал могут влиять на жесткость свариваемой конструкции. Как тепловое поле, так и жесткость конструкции оказывают сильное влияние на присущую деформацию, которая определяет остаточное напряжение и деформацию, замеченная корреляция между переменными гарантирует, что входные данные будут варьироваться в зависимости от выходных данных самообучения системы. Остаточные напряжения и деформация являются ключевыми факторами в определении надежности и срока службы сварной металлоконструкции горных машин в практическом проектировании [11–13].

Сравнение предсказаний нейронной сети и результатов анализа методом конечных элементов показывает, что модель нейронной сети достаточно точна и эффективна в прогно-

зировании остаточных напряжений и деформаций. Это делает процедуру прогнозирования более эффективной и менее трудоемкой.

Следует учитывать, что для сварных соединений, подвергающихся циклической нагрузке в течение срока службы, остаточные напряжения не находятся на постоянном уровне, а расслабляются в течение циклов нагружения, что создает дополнительные проблемы при анализе остаточных напряжений. Некоторые исследователи обнаружили влияние приложенной циклической нагрузки на остаточные напряжения и фиксировали расслабление остаточных напряжений в сварных конструкциях. Экспериментальные данные исследования сварных соединений под изгибающими нагрузками показывают, что остаточные напряжения уменьшаются, когда приложенные напряжения эквивалентны 95 % предела текучести. Они также определили некоторые факторы, влияющие на расслабление остаточных напряжений из-за циклической нагрузки, такие как начальные распределения остаточных напряжений, амплитуда напряжений, коэффициент напряжений, количество циклов и пластичность материала со степенью кинематического упрочнения или размягчения. На сегодняшний день несколько исследований показали, что значительные ре-



лаксации происходят уже в первом цикле загрузки. Для прогнозирования релаксации остаточных напряжений крайне важно все вышеупомянутое, а также модели с различными влияющими факторами.

Влияние остаточных сварочных напряжений на надежность горных машин и оборудования, эксплуатируемых на карьерах Севера, где на отрицательные среднесуточные температуры приходится более полугода, является существенным, поскольку оно приводит к хрупким разрушениям. Хрупкие разрушения возникают при неблагоприятном сочетании конструктивных, технологических и эксплуатационных факторов. Как показывает практика, изучение хрупкого разрушения как наиболее опасного вида разрушений, развивающегося катастрофически быстро и под действием сравнительно низких напряжений, гораздо важнее, чем вязкого.

В качестве основных факторов, влияющих на разрушения горных машин, можно отметить следующее: значительные циклические нагрузки, испытываемые металлоконструкциями; большие динамические и статические напряжения; низкие значения и существенные колебания суточных температур в весенне-зимний период эксплуатации; недостаточная пластичность и показатели хладостойкости используемых материалов.

У большинства крупногабаритных сварных деталей при больших толщинах сечений конструкций, при изменении свойств металла из-за наклепа, старения, вида термообработки, а также при пересечении швов, расположенных пространственно, возникает местное уменьшение пластичности вследствие сложного объемного напряженного состояния. На долговечность металлоконструкций существенную роль оказывает характер их нагружения и остаточные напряжения, возникающие после сборки и сварки.

Для увеличения сопротивления металлоконструкций хрупкому разрушению используют стали повышенной хладостойкости либо, если возможно, увеличивают толщину элементов или приваривают усилители (косынки, накладки и т. п.). В результате исследований, проведенных в Удачнинском и Айхальском горно-обогатительных комбинатах АК «АЛРОСА»,

установлено, что трещины в зоне сварного соединения возникают в некоторых случаях на концевых участках швов. Этот факт не случаен, так как в конце швов, как правило, имеют место конструктивные (сопряжения различных элементов – трубы и листового металла) и технологические (высокие остаточные напряжения) концентраторы. Этот факт отмечен на нижней и верхней секции стрелы экскаваторов ЭКГ-8И, ЭКГ-12,5 и их модификациях ЭКГ-10 и ЭКГ-15 [14].

При стыковой многопроходной сварке выполнение уже второго шва приводит к значительному увеличению поперечной усадки соединения $\Delta_{пу}$ и явно выраженной неравномерности ее вдоль стенки:

$$\Delta_{пу} = \frac{\alpha}{c \cdot \rho} \cdot \frac{q}{v_c \cdot \delta_n}, \quad (1)$$

где α – коэффициент линейного расширения, $1/K$; c – удельная теплоемкость, $Дж/(кг \cdot K)$; ρ – плотность, $кг/м^3$; $c \cdot \rho$ – объемная теплоемкость, $Дж/м^3 \cdot K$; q – эффективная тепловая мощность источника нагрева, $кВт$; v_c – скорость сварки, $м/с$; δ_n – толщина пластины, $м$.

Причина возникновения градиента поперечной усадки при сварке толстостенных элементов находит качественное объяснение в следующем. Первый шов выполняется практически по ненапряженному металлу. Влияние прихваток, если они используются, не вызывает практически никакого напряжения в соединенных элементах. Примерно равномерная поперечная усадка, определяемая по зависимости (2), возникает в результате термомеханических явлений, имеющих место в зоне сварного соединения во время термического цикла сварки. При наложении первого шва остаточное напряженное состояние в его зоне является самоуравновешенным.

Второй шов выполняют по напряженному металлу. В результате вторичного переплавления части стыка напряженное состояние в зоне соединения становится неуравновешенным, что приводит к перераспределению поля остаточных напряжений непосредственно во время сварки и деформации в плоскости свариваемых элементов. Экспериментально, а также в результате измерений на натурных образцах установлено, что максимальная поперечная усадка всегда имеет место в начале выполнения второго шва. Сварка второго шва



приводит при достаточно высокой линейной энергии к «перерезанию» имеющегося сварного соединения от первого прохода. В зоне дуги при втором проходе в результате перераспределения продольных и поперечных остаточных напряжений возникают момент M_x и усилие P_x . Модель распределения сил при стыковой многопроходной сварке представлена на рис. 2 [15]. При этом

$$M_x = P_x \cdot h, \quad (2)$$

где M_x – изгибающий момент; P_x – равнодействующая остаточных усилий сжатия или растяжения половины эпюры остаточных усилий (напряжений); h – расстояние между равнодействующими силами половины эпюры.

Момент M_x может быть значительным, так как в зоне соединения для малоуглеродистых и низколегированных сталей остаточные напряжения достигают предела текучести. Вместе с тем момент M_x примерно остается постоянным при выполнении второго шва, так как эпюра остаточных продольных напряжений мало изменяется вдоль оси соединения за исключением концевых участков. У конца шва имеют место высокие поперечные напряжения (230 МПа), а вблизи оси шва – высокий пик сжимающих напряжений (276 МПа). Поперечные напряжения вблизи кромки по всему сечению являются растягивающими и достигают своего максимума (130 МПа) в середине пластины. Такое распределение напряжений объясняется поперечной усадкой и наличием масштабного фактора.

Еще большая величина остаточных напряжений сварки наблюдаются, если конструкция сваривается полкой в виде коробчатого сечения.

На карьерах Севера все большее применение находят гидравлические погрузчики и экскаваторы с коробчатым сечением стрел и рукоятей. Тем не менее балочные конструкции рабочего оборудования этих машин подвержены значительным изгибающим нагрузкам, которые наряду с низкими температурами вызывают образование трещин в металлоконструкциях. Обычно балки коробчатого сечения собирают на жестких прихватках для сохранения взаимного расположения стыкуемых элементов, поэтому можно считать, что сечение балки работает как одно целое. Для изготовления рабочего оборудования экскаваторов и погрузчиков наиболее широкое распространение получили малоуглеродистые и низколегированные стали. Высокопрочные и высоколегированные стали не используются ввиду их высокой стоимости, ограниченного объема их выпуска и усталостных явлений, обусловленных характером работы горно-транспортного оборудования. Применение низколегированных сталей в стреле и рукояти наиболее рационально при больших нагрузках на рабочий орган, когда размеры сечений определяются не столько из условий жесткости, сколько из условий прочности.

При сварке кольцевых многопроходных швов возникновение напряжений зависит как от поперечной усадки очередного уложенного

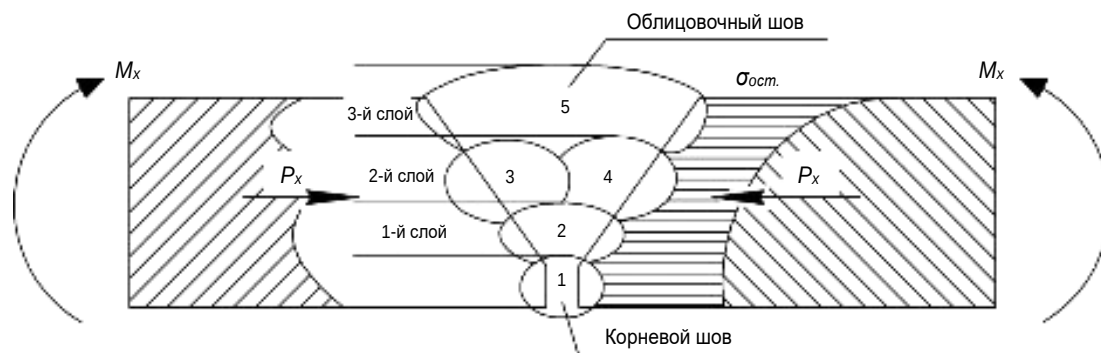


Рис. 2. Модель распределения сил при стыковой многопроходной сварке:

$\sigma_{ост.}$ – остаточное напряжение в металлоконструкции при многопроходной сварке;

M_x – изгибающий момент; P_x – равнодействующая остаточных усилий сжатия или растяжения половины эпюры остаточных усилий (напряжений)

Fig. 2. Force distribution model for butt multi-pass welding

$\sigma_{ост.}$ – residual stress in the metal structure under multi-pass welding;

M_x – bending moment; P_x – resultant force of the residual compressive or tensile forces of the half of the diagram of residual forces (stresses)



валика, так и от его продольной усадки. Образование напряжений и пластических деформаций в корне шва зависит от типа разделки и последовательности укладки валиков.

При укладке очередного слоя в разделку независимо от того, уложен он с внутренней или с наружной стороны толстостенной трубы, возникает окружная усадка слоя, вызывающая радиальную нагрузку, которая направлена к оси цилиндра.

При сварке разделкой наружу, коим образом, собственно, и свариваются все трубчатые конструкции экскаватора ЭКГ-15, изгибающий момент от поперечной усадки очередного слоя создает напряжение, направленное к оси оболочки, что совпадает с приращением напряжения от окружной усадки.

В практическом отношении больший интерес представляют поперечные деформации в корне многослойного шва с V-образной разделкой. Они могут оказаться настолько значительными, что вызовут разрушение металла.

При сварке V-образной разделкой наружу окружная усадка и изгибающие моменты вызывают растягивающие напряжения в корне шва, а поперечная усадка – сжимающие. При этом в корне шва практически всегда возникает растяжение.

Независимо от примененного способа сварки сварные соединения следует рассматривать как металлургические неоднородные области, простирающиеся от исходного металла через зону термического влияния, испытавшую воздействие высоких температур, до металла сварного шва, который можно считать литым металлом.

Подвергнув термообработке все сварное соединение, можно получить почти однородную металлургическую структуру наплавленного и исходного металлов. Тем не менее, как правило, у сварных соединений, впрочем, как и у резьбовых, заклепочных, усталостная прочность всегда ниже, чем у монолитной детали из такого же материала. Это связано со следующими факторами:

– нарушением однородности материала в зоне сварки и растрескиванием свариваемого металла и металла сварного шва из-за усадочных напряжений, возникающих в зоне термического влияния при охлаждении;

– недостаточностью глубины проникания металла сварного шва в основной металл;

– недостаточностью сплавления исходного металла и металла сварного шва в местах предыдущей сварки; подрезами на концах сварных швов из-за неаккуратной сварки;

– натеками металла сварного шва за пределы зоны сварки;

– шлаковыми включениями и пористостью, возникающими при нарушении технологии сварки;

– наличием поверхностных дефектов сварки [16–19].

Указанные явления приводят к концентрации напряжений. Концентрация напряжений, локализуемая геометрическими особенностями конструкции, а также она в местах соединения деталей существенно влияет на усталостную прочность (долговечность). Размеры вырезов, отверстий, канавок, мест соединений и других концентраторов напряжений зависят от их относительного расположения, вида напряжения и механических свойств материала детали. При восстановлении детали рекомендуется учитывать три рода напряжений:

1. Напряжениями первого рода называются остаточные напряжения сжатия – растяжения, уравнивающие себя в пределах детали или ее части.

2. Напряжения второго рода возникают при эксплуатации машин. При неравномерном распределении температуры в элементе конструкции между соседними зернами металла появляется несогласованность. Если какое-либо зерно структуры при охлаждении стремится сократиться, то соседние зерна будут препятствовать этому. Таким образом, они взаимно напрягут друг друга. В зерне, которое стремилось сократиться, возникают силы растяжения, а зерно, которое сопротивлялось, окажется сжатым. И чем больше перепад температур при быстром остывании детали, тем больше будут эти силы. В некоторых материалах они так велики, что детали растрескиваются или «взрываются» сразу или со временем.

3. Внутренние напряжения третьего рода возникают уже на атомарном уровне. Дефекты, вызываемые такими напряжениями,



настолько малы, что на протяжении десятков расстояний между атомами они уже исчезают. Они существуют как несовершенства структуры кристаллической решетки, являющиеся источниками дислокаций [14, 20].

Экспериментальные данные показывают, что расслабление остаточных напряжений происходит в основном в течение первого цикла нагрузки. Величина релаксации зависит от пластической деформации и, следовательно, от максимальной нагрузки циклических нагрузок. Остаточное напряжение и его расслабление влияют на коэффициент напряжений без изменения циклического диапазона напряжений.

Результаты исследования и их обсуждение

Остаточные напряжения вредны для металлоконструкций, полученных способом сварки, однако существуют способы уменьшения их величины. В настоящее время известно несколько основных принципов, лежащих в основе методов устранения остаточных деформаций и напряжений при сварке металлоконструкций. К ним относятся:

- уменьшение пластических деформаций сжатия при сварке путем подогрева, снижения распределенной энергии, уменьшения катетов швов, искусственного охлаждения, предварительной деформации растяжения;
- создание пластических деформаций в процессе сварки или после полного остывания путем прокатки, проковки, предварительного прогиба;
- компенсация пластических деформаций посредством термической правки, симметричного расположения швов.

Наиболее часто используемым способом предотвращения остаточных напряжений является предварительный нагрев соединения во время сварки. Он замедляет скорость охлаждения. Это гарантирует, что напряжения, развивающиеся в детали, в начале будут иметь меньшую величину.

Предварительный нагрев присадочной проволоки также может быть использован в качестве метода уменьшения напряжений в металлоконструкциях горных машин. С увеличением значения предварительного нагрева

присадочной проволоки сварочный ток уменьшается, что приводит к стабилизации сварочной дуги и снижению теплоотдачи. Снижение теплоотдачи уменьшает максимальное напряжение, вызванное внутри и вокруг сварных швов, что снижает уровень искажений в свариваемой конструкции. Снижение теплоотдачи и стабильная дуга также указывают на то, что предварительный нагрев присадочной проволоки очень эффективен в уменьшении растрескивания сварочного и основного металла. Более высокая скорость охлаждения с увеличением предварительного нагрева присадочной проволоки приводит к образованию в сварочном металле мелких зерен, что свидетельствует об улучшении металлургических и механических свойств сварного шва.

Очень эффективным способом снятия остаточных напряжений является подвержение сварного шва термической обработке после сварки. Термическая обработка может быть выполнена как локально только для зоны сварного шва, так и для всей конструкции в целом. Метод основан на многоэтапном воздействии общего высокого отпуска при сварке углеродистых металлоконструкций, предполагающем нагрев до температуры порядка 650 °C с выдержкой в течение 2–3 мин на каждый 1 мм толщины металла. С целью предотвращения повторного возникновения остаточных напряжений следует контролировать процесс охлаждения. Режим охлаждения зависит от химического состава стали и элементов, способствующих закалке, при высоком их содержании охлаждение должно протекать как можно медленнее.

Еще одним способом снятия остаточных сварочных напряжений является воздействие неплавящимся электродом в среде аргона на участок сварного шва в зоне перехода к основному металлу. Вследствие процесса плавления части металла происходит ослабление внутренних остаточных напряжений, что способствует образованию более плавного перехода основного металла к сварному шву, а также значительному повышению прочностных характеристик сварных соединений при знакопеременных нагрузках.

Вибрационное старение может использоваться как метод устранения остаточного



внутреннего напряжения. Его сущность заключается в том, чтобы через вибрацию уменьшить пластическую деформацию, вызванную внутренними остаточными напряжениями, с целью устранения остаточных напряжений. Принцип способа заключается в размещении моторной системы с эксцентриковым вибратором на конструкции, создании состояния резонанса и проведении вибрационной обработки металлоконструкции с целью снижения внутренних напряжений. Данный метод имеет низкие требования, для него характерна простая работа на участке механообработки, которая принята большинством заводов-изготовителей. Структура и внешний вид деталей при этом не изменяются из-за влияния внешней среды, поэтому стабильность деталей гарантирована.

Метод проковки околошовной зоны позволяет создать дополнительные пластические деформации, что способствует практически полному снятию остаточных сварных напряжений, а также повышению усталостной прочности конструкции. С целью предотвращения образования надрывов процесс проковки не следует осуществлять в интервале температур 200–400 °С. В целях предотвращения возникновения трещин при многослойной сварке проковывают каждый слой за исключением первого, для этого используют ручные слесарные инструменты или применяют механизированные способы воздействия с небольшим усилием.

Эффективным способом снятия сварочных напряжений является создание внешних статических воздействий на элементы металлоконструкций карьерных экскаваторов, значения которых близки к пределу текучести металла. Такой способ снятия остаточных напряжений рекомендуется применять для конструкций, работающих в тяжелых условиях эксплуатации при низких отрицательных температурах и больших значениях динамических нагрузок.

Рассматривая металлоконструкции горных машин и оборудования, также следует понимать, что все виды напряжений не существуют отдельно друг от друга. Они суммируются, достигая на некоторых участках крити-

ческой величины, которая и приводит к их разрушению [21–24].

Заключение

Остаточные напряжения в металлоконструкциях карьерного оборудования, вызванные сваркой, представляют собой самоуравновешивающиеся напряжения в структуре, возникающие в результате сопротивления усадке, вызванной неоднородным распределением температуры в процессе сварки. Для сварных конструкций растягивающие остаточные напряжения потенциально приводят к пагубным последствиям для целостности и долговечности конструкции, поскольку могут вызывать возникновение трещины и снизить ударную вязкость материала. Определение остаточных напряжений на ранних стадиях позволяет принимать упреждающие меры по снижению затрат на ремонт и техническое обслуживание сварных металлоконструкций.

Оценка сварного шва на основе механики разрушения требует детального знания распределения остаточных напряжений на поверхности и в направлении толщины металлоконструкций. Несмотря на наличие различных техник и аналитических методов для количественной оценки остаточных напряжений сварки, определение точного профиля остаточных напряжений остается довольно сложной задачей.

Для определения точного распределения сварочных остаточных напряжений в сварных швах существует множество хорошо зарекомендовавших себя методов измерения, многие из которых являются разрушающими способами. Такие методы разрушают образец материала для снятия напряжений механическими или химическими средствами и измеряют деформацию образца для расчета остаточного напряжения на основе упругости материала, при этом дальнейшее использование конструкции не представляется возможным. Метод конечных элементов является эффективным средством для того, чтобы понять эволюцию остаточных напряжений в процессе сварки. В связи с этим неразрушающие методы оценки остаточных напряжений оказываются более предпочтительным вариантом.



Список источников

1. Guo J., Fu H., Pan B., Kang R. Recent progress of residual stress measurement methods: a review // Chinese Journal of Aeronautics. 2021. Vol. 34. Iss. 2. P. 54–78. <https://doi.org/10.1016/j.cja.2019.10.010>.
2. Zerbst U., Ainsworth R.A., Beier H.Th., Pisarski H., Zhang Z.L., Nikbin K., et al. Review on fracture and crack propagation in weldments – a fracture mechanics perspective // Engineering Fracture Mechanics. 2014. Vol. 132. P. 200–276. <https://doi.org/10.1016/j.engfracmech.2014.05.012>.
3. Joseph A., Rai S.K., Jayakumar T., Murugan N. Evaluation of residual stresses in dissimilar weld joints // International Journal of Pressure Vessels and Piping. 2005. Vol. 82. Iss. 9. P. 700–705. <https://doi.org/10.1016/j.ijpvp.2005.03.006>.
4. Hensel J., Nitschke-Pagel T., Tchoffo Ngoula D., Beier H.-Th., Tchuindjang D., Zerbst U., Welding residual stresses as needed for the prediction of fatigue crack propagation and fatigue strength // Engineering Fracture Mechanics. 2018. Vol. 198. P. 123–141. <https://doi.org/10.1016/j.engfracmech.2017.10.024>.
5. Michaleris P., Dantzig J., Tortorelli D.A. Minimization of welding residual stress and distortion in large structures // Welding Journal. 1999. Vol. 78. Iss. 11. P. 361.
6. Xu S., Thermal Stress Analysis of dissimilar welding joints by Finite Element Method // Procedia Engineering. 2011. Vol. 15. P. 3860–3864. <https://doi.org/10.1016/j.pro-eng.2011.08.722>.
7. Larsen M.L., Arora V., Clausen H.B. Finite element shape optimization of weld orientation in simple plate structure considering different fatigue estimation methods // Procedia Structural Integrity. 2021. Vol. 31. P. 70–74. <https://doi.org/10.1016/j.prostr.2021.03.011>.
8. Зива В.В., Косухина А.А., Осадчий С.О. Анализ факторов, влияющих на результаты теплового анализа методом конечных элементов // Студенческий форум. 2020. № 26. С. 28–32 [Электронный ресурс]. URL: <https://nauchforum.ru/archive/studjournal/26%28119%29.pdf> (15.12.2022).
9. Занин А.В., Квасов И.Н. Расчет врезки трубопровода с использованием программного продукта ANSYS и анализ с помощью метода конечных элементов // Динамика систем, механизмов и машин. 2019. Т. 7. № 2. С. 103–113. <https://doi.org/10.25206/2310-9793-7-2-103-113>.
10. Борискина З.М., Барышникова О.О. Анализ деформированного состояния металлоконструкций подъемно-транспортных машин с использованием метода конечных элементов // Проблемы механики современных машин: материалы V Междунар. конф. (г. Улан-Удэ, 25–30 июня 2012 г.). Улан-Удэ: Изд-во ВСГТУ, 2012. Т. 2. Ч. 1. С. 53–56.
11. Liu F., Tao C., Dong Z., Jiang K., Zhou S., Zhang Z., et al. Prediction of welding residual stress and deformation in electro-gas welding using artificial neural network // Materials Today Communications. 2021. Vol. 29. P. 102786. <https://doi.org/10.1016/j.mtcomm.2021.102786>.
12. Mathew J., Moat R.J., Paddea S., Fitzpatrick M.E., Bouchard P.J. Prediction of residual stresses in girth welded pipes using an artificial neural network approach // International Journal of Pressure Vessels and Piping. 2017. Vol. 150. P. 89–95. <https://doi.org/10.1016/j.ijpvp.2017.01.002>.
13. Na M.-G., Kim J.-W., Lim D.-H. Prediction of residual stress for dissimilar metals welding at nuclear power plants using fuzzy neural network models // Nuclear Engineering and Technology. 2007. Vol. 39. Iss. 4. P. 337–348. <https://doi.org/10.5516/NET.2007.39.4.337>.
14. Макаров А.П. Развитие усталостных трещин в металлоконструкциях экскаваторов // Вестник Иркутского государственного технического университета. 2011. № 11. С. 105–109.
15. Макаручук А.В., Макаручук Н.В., Старцев В.Н. Разработка математической модели многопроходной дуговой сварки // Вестник Государственного университета морского и речного флота имени адмирала С.О. Макарова. 2017. № 1. С. 121–131.
16. Серенко А.Н. Оценка влияния остаточных напряжений на кинетику развития усталостных трещин в сварных соединениях. Часть I // Вісник Приазовського Державного Технічного Університету. Серія: Технічні науки. 2011. № 22. С. 156–161.
17. Загорин А.С., Любимова Л.Л., Буваков К.В., Кулеш А.С., Ташлыков А.А., Кулеш Р.Н. Влияние остаточных напряжений в зонах сварного узла на сопротивление хрупким разрушениям // Известия Томского политехнического университета. Инжиниринг георесурсов. 2018. Т. 329. № 10. С. 128–142. <https://doi.org/10.18799/24131830/2018/10/2112>.
18. Авдеев А.Н., Храмовских В.А. Анализ отказов базовых узлов экскаваторов, работающих в районах Крайнего Севера // Горное оборудование и электромеханика. 2005. № 1. С. 53–55.
19. Храмовских В.А. Оценка ресурса базовых узлов металлоконструкций карьерных экскаваторов на основе обработки статистической информации // Вестник Иркутского государственного технического университета. 2005. № 1. С. 167.
20. Hensel J., Nitschke-Pagel T., Tchoffo Ngoula D., Beier H.-Th., Tchuindjang D., Zerbst U. Welding residual stresses as needed for the prediction of fatigue crack propagation and fatigue strength // Engineering Fracture Mechanics. 2018. Vol. 198. P. 123–141. <https://doi.org/10.1016/j.engfracmech.2017.10.024>.
21. Макаров А.П., Шевченко А.Н., Павлов А.М. Определение критической длины трещины в металлоконструкциях карьерных экскаваторов // Вестник Иркутского государственного технического университета. 2015. № 12. С. 57–63.
22. Серебренников А.В., Демченко И.И., Серебренников В.Л. Оценка методов и приборов для измерения механических напряжений в конструкционных материалах горных машин // Безопасность труда в промышленности. 2013. № 11. С. 56–62.
23. Panfilova O.R., Dyorina N.V., Velikanov V.S. Substantiation of parameters of metal structure elements of mining transport machines // Известия Уральского государственного горного университета. 2020. № 2. С. 110–



116. <https://doi.org/10.21440/2307-2091-2020-2-110-116>.
24. Серебренников А.В., Демченко И.И., Серебренников В.Л., Левченко Е.А. Способ измерения локальных

напряжений в металлоконструкциях горных машин // Безопасность труда в промышленности. 2016. № 6. С. 42–46.

References

1. Guo J., Fu H., Pan B., Kang R. Recent progress of residual stress measurement methods: a review. *Chinese Journal of Aeronautics*. 2021;34(2):54-78. <https://doi.org/10.1016/j.cja.2019.10.010>.

2. Zerbst U., Ainsworth R.A., Beier H.Th., Pisarski H., Zhang Z.L., Nikbin K., et al. Review on fracture and crack propagation in weldments – a fracture mechanics perspective. *Engineering Fracture Mechanics*. 2014;132:200-276. <https://doi.org/10.1016/j.engfracmech.2014.05.012>.

3. Joseph A., Rai S.K., Jayakumar T., Murugan N. Evaluation of residual stresses in dissimilar weld joints. *International Journal of Pressure Vessels and Piping*. 2005; 82(9):700-705. <https://doi.org/10.1016/j.ijpvp.2005.03.006>.

4. Hensel J., Nitschke-Pagel T., Tchoffo Ngoula D., Beier H.-Th., Tchuindjang D., Zerbst U., Welding residual stresses as needed for the prediction of fatigue crack propagation and fatigue strength. *Engineering Fracture Mechanics*. 2018;198:123-141. <https://doi.org/10.1016/j.engfracmech.2017.10.024>.

5. Michaleris P., Dantzig J., Tortorelli D.A. Minimization of welding residual stress and distortion in large structures. *Welding Journal*. 1999;78(11):361.

6. Xu S., Thermal Stress Analysis of dissimilar welding joints by Finite Element Method. *Procedia Engineering*. 2011;15:3860-3864. <https://doi.org/10.1016/j.proeng.2011.08.722>.

7. Larsen M.L., Arora V., Clausen H.B. Finite element shape optimization of weld orientation in simple plate structure considering different fatigue estimation methods. *Procedia Structural Integrity*. 2021;31:70-74. <https://doi.org/10.1016/j.prostr.2021.03.011>.

8. Ziva V.V., Kosukhina A.A., Osadchii S.O. Analysis of factors affecting the results of thermal analysis performed by the finite element method. *Studencheskii forum*. 2020;26:28-32. Available from: <https://nauchforum.ru/archive/studjournal/26%28119%29.pdf> [Accessed 15th December 2022]. (In Russ.).

9. Zanin A.V., Kvasov I.N. Analysis of tie-in calculations for the pipeline using ANSYS software and analysis with finite element method. *Dinamika sistem, mekhanizmov i mashin = Dynamics of Systems, Mechanisms and Machines (Dynamics)*. 2019;7(2):103-113. (In Russ.). <https://doi.org/10.25206/2310-9793-7-2-103-113>.

10. Boriskina Z.M., Baryshnikova O.O. Analysis of the deformed state of hoisting and transport machine metal structures using the finite element method. In: *Problemy mekhaniki sovremennykh mashin: materialy V Mezhdunar. konf. = Problems of modern machinery mechanics: materials of the 5th International conference*. 25–30 July 2012, Ulan-Ude. Ulan-Ude: East Siberia State University of Technology and Management; 2012, vol. 2, pt. 1, p. 53–56. (In Russ.).

11. Liu F., Tao C., Dong Z., Jiang K., Zhou S., Zhang Z., et al. Prediction of welding residual stress and deformation in electro-gas welding using artificial neural net-

work. *Materials Today Communications*. 2021;29:102786. <https://doi.org/10.1016/j.mtcomm.2021.102786>.

12. Mathew J., Moat R.J., Paddea S., Fitzpatrick M.E., Bouchard P.J. Prediction of residual stresses in girth welded pipes using an artificial neural network approach. *International Journal of Pressure Vessels and Piping*. 2017;150:89-95. <https://doi.org/10.1016/j.ijpvp.2017.01.002>.

13. Na M.-G., Kim J.-W., Lim D.-H. Prediction of residual stress for dissimilar metals welding at nuclear power plants using fuzzy neural network models. *Nuclear Engineering and Technology*. 2007;39(4):337-348. <https://doi.org/10.5516/NET.2007.39.4.337>.

14. Makarov A.P. Development of fatigue cracks in excavator metal structures. *Vestnik Irkutskogo gosudarstvennogo tekhnicheskogo universiteta = Proceedings of Irkutsk State Technical University*. 2011;11:105-109. (In Russ.).

15. Makarchuk A.V., Makarchuk N.V., Startsev V.N. Mathematical model elaboration of multi-pass arc welding. *Vestnik Gosudarstvennogo universiteta morskogo i rechnogo flota imeni admirala S.O. Makarova*. 2017;1:121-131. (In Russ.).

16. Serenko O.M. Estimation of effects of residual stresses on kinetics of fatigue cracks development in welded joints. Part 1. *Vestnik Priazovskogo gosudarstvennogo tekhnicheskogo universiteta. Seriya: Tekhnicheskie nauki = Reporter of the Priazovskyi State Technical University. Section: Technical sciences*. 2011;22:156-161. (In Russ.).

17. Zavorin A.S., Lyubimova L.L., Buvakov K.V., Kulesh A.S., Tashlykov A.A., Kulesh R.N. Influence of residual stresses on resistance to brittle fracture in weldment zones. *Izvestiya Tomskogo politekhnicheskogo universiteta. Inzhiniring georesursov = Bulletin of the Tomsk Polytechnic University. Geo Assets Engineering*. 2018;329(10):128-142. (In Russ.). <https://doi.org/10.18799/24131830/2018/10/2112>.

18. Avdeev A.N., Khramovskikh V.A. Analysis of failures of excavator basic units operating in the Far North. *Gornoe oborudovanie i elektromekhanika = Mining Equipment and Electromechanics*. 2005;1:53-55. (In Russ.).

19. Khramovskikh V.A. Estimating service life of mining excavator basic unit metal structures based on statistical information processing. *Vestnik Irkutskogo gosudarstvennogo tekhnicheskogo universiteta = Proceedings of Irkutsk State Technical University*. 2005;1:167. (In Russ.).

20. Hensel J., Nitschke-Pagel T., Tchoffo Ngoula D., Beier H.-Th., Tchuindjang D., Zerbst U. Welding residual stresses as needed for the prediction of fatigue crack propagation and fatigue strength. *Engineering Fracture Mechanics*. 2018;198:123-141. <https://doi.org/10.1016/j.engfracmech.2017.10.024>.

21. Makarov A.P., Shevchenko A.N., Pavlov A.M. Crack critical length determination in mining shovel metal structures. *Vestnik Irkutskogo gosudarstvennogo tekhnicheskogo universiteta = Proceedings of Irkutsk State Technical University*. 2015;12:57-63. (In Russ.).

22. Serebrennikov A.V., Demchenko I.I., Serebrennikov



V.L. Assessment of the methods and devices for measuring mechanical stresses in the construction materials of the mining machines. *Bezopasnost' truda v promyshlennosti = Monthly Journal of Research and Production*. 2013;11:56-62. (In Russ.).

23. Panfilova O.R., Dyorina N.V., Velikanov V.S. Substantiation of parameters of metal structure elements of mining transport machines. *Izvestiya Ural'skogo gosudarstvennogo gornogo universiteta = News of the Ural State Mining University*. 2020;2:110-116. <https://doi.org/10.21440/2307-2091-2020-2-110-116>.

24. Serebrennikov A.V., Demchenko I.I., Serebrennikov V.L., Levchenko E.A. Way of measurement of local tensions in the steel structures of mining machines. *Bezopasnost' truda v promyshlennosti = Monthly Journal of Research and Production*. 2016;6:42-46. (In Russ.).

24. Serebrennikov A.V., Demchenko I.I., Serebrennikov V.L., Levchenko E.A. Way of measurement of local tensions in the steel structures of mining machines. *Bezopasnost' truda v promyshlennosti = Monthly Journal of Research and Production*. 2016;6:42-46. (In Russ.).

Информация об авторах / Information about the authors



Макаров Анатолий Павлович,

кандидат технических наук, доцент,
доцент кафедры горных машин и электромеханических систем,
Институт недропользования,
Иркутский национальный исследовательский технический университет,
г. Иркутск, Россия,
mak@istu.edu

Anatoly P. Makarov,

Cand. Sci. (Eng.), Associate Professor,
Associate Professor of the Department of Mining Machines
and Electromechanical Systems,
Institute of Subsoil Use,
Irkutsk National Research Technical University,
Irkutsk, Russia,
mak@istu.edu

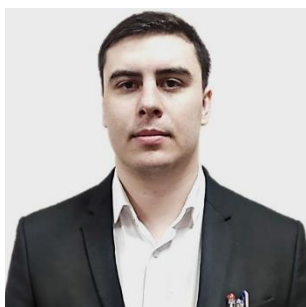


Храмовских Виталий Александрович,

кандидат технических наук, доцент,
доцент кафедры горных машин и электромеханических систем,
Институт недропользования,
Иркутский национальный исследовательский технический университет,
г. Иркутск, Россия,
✉ wax@istu.edu
<https://orcid.org/0000-0003-0590-0393>

Vitaly A. Khramovskikh,

Cand. Sci. (Eng.), Associate Professor,
Associate Professor of the Department of Mining Machines
and Electromechanical Systems,
Institute of Subsoil Use,
Irkutsk National Research Technical University,
Irkutsk, Russia,
✉ wax@istu.edu
<https://orcid.org/0000-0003-0590-0393>



Непомнящих Кирилл Андреевич,

аспирант,
ассистент кафедры горных машин и электромеханических систем,
Институт недропользования,
Иркутский национальный исследовательский технический университет,
г. Иркутск, Россия,
nka@istu.edu

Kirill A. Nepomnyashchikh,

Postgraduate Student,
Assistant Professor of the Department of Mining Machines
and Electromechanical Systems,
Institute of Subsoil Use,
Irkutsk National Research Technical University,
Irkutsk, Russia,
nka@istu.edu



Вклад авторов / Contribution of the authors

Все авторы сделали эквивалентный вклад в подготовку публикации.
The authors contributed equally to this article.

Конфликт интересов / Conflict of interests

Авторы заявляют об отсутствии конфликта интересов.
The authors declare no conflicts of interests.

Все авторы прочитали и одобрили окончательный вариант рукописи.
The final manuscript has been read and approved by all the co-authors.

Информация о статье / Information about the article

Статья поступила в редакцию 16.01.2023; одобрена после рецензирования 27.01.2023; принята к публикации 13.02.2023.

The article was submitted 16.01.2023; approved after reviewing 27.01.2023; accepted for publication 13.02.2023.



ТЕХНОЛОГИЯ И ТЕХНИКА ГЕОЛОГО-РАЗВЕДОЧНЫХ РАБОТ

Научная статья

УДК 504.062.4

<https://doi.org/10.21285/2686-9993-2023-46-1-84-96>**Технологические решения рекультивации промплощадки
бывшего аккумуляторного завода «Востсибэлемент»****А.В. Богданов^а, А.И. Шкрабо^б, А.С. Шатрова^с**^{а-с}*Иркутский национальный исследовательский технический университет, г. Иркутск, Россия*

Резюме. Целью представленного исследования являлась инвентаризация источников накопленного вреда промышленной площадки бывшего аккумуляторного завода «Востсибэлемент», расположенной в черте муниципального образования «г. Свирск» Иркутской области (Россия), а также анализ их влияния на состояние окружающей среды. В ходе проведенных работ авторами был рассчитан критерий численной оценки общего влияния объекта накопленного вреда окружающей среде на состояние экологической безопасности. На основе полученных результатов сделано заключение о том, что промышленная площадка бывшего завода «Востсибэлемент» является источником накопленного вреда, а также крайне экологически опасным объектом в связи со своим расположением в черте муниципального образования «г. Свирск» и водоохранной зоны реки Ангары, представляющим потенциальную угрозу всей территории верхней части Братского водохранилища. По данным мониторинга построена геостатистическая модель рассеяния подвижных форм свинца в почве, установлены аномальные зоны загрязнения. В почве на территории промышленной площадки бывшего аккумуляторного завода «Востсибэлемент» было выявлено три участка с аномально большим, более 6000 мг/кг, содержанием подвижных форм свинца. На всей территории промышленной площадки содержание подвижного свинца в поверхностном слое (0–20 см) не опускается ниже 100 мг/кг, что выше предельно допустимой концентрации в 17 раз. Установлено превышение содержания свинца в лапчатке гусиной (*Potentilla anserina*), которое составило 10 фоновых значений. В разовой точечной пробе донных отложений реки Ангары в начале промышленной площадки, в четырех метрах от уреза береговой линии, зафиксировано превышение фонового содержания по свинцу, меди, цинку в 59, 12 и 4,7 раза соответственно. В результате проведенных работ на основании полученных данных и представлений о наилучших доступных технологиях предложена концепция экологически безопасной рекуперативной технологии рекультивации промышленной площадки бывшего завода ОАО «Востсибэлемент», которая является весьма эффективной как с технико-экономической, так и с правовой и социально-экологической точки зрения и может быть рассмотрена в качестве варианта ликвидации накопленного вреда крайне опасного объекта.

Ключевые слова: мониторинг, накопленный вред, рекультивация, почва, свинец, рекуперация

Для цитирования: Богданов А.В., Шкрабо А.И., Шатрова А.С. Технологические решения рекультивации промплощадки бывшего аккумуляторного завода «Востсибэлемент» // Науки о Земле и недропользование. 2023. Т. 46. № 1. С. 84–96. <https://doi.org/10.21285/2686-9993-2023-46-1-84-96>.

TECHNOLOGY AND EQUIPMENT OF GEOLOGICAL EXPLORATION

Original article

**Process engineering solutions for reclamation
of former Vostsibelement battery plant industrial site****Andrey V. Bogdanov^a, Anna I. Shkrabo^b, Anastasiya S. Shatrova^c**^{а-с}*Irkutsk National Research Technical University, Irkutsk, Russia*

Abstract. The purpose of the present research is the inventory of the sources of accumulated contaminants at the former Vostsibelement industrial site located within the municipality of the town of Svirsk of the Irkutsk region (Russia) as well as



the analysis of their impact on the environmental conditions. The conducted study included the calculation of the numerical assessment criterion of the overall impact of the accumulated environmental damage site on the state of environmental safety. On the basis of the results obtained, it was concluded that the industrial site of the former Vostsibelement factory is a source of accumulated harm, as well as an extremely environmentally hazardous site posing a potential threat to the entire upper territory of the Bratsk reservoir due to its location within the boundaries of the municipality of the town of Svirsk and the water protection zone of the Angara river. Based on the monitoring data, a geostatistical dispersion model of mobile lead in soil was constructed and anomalous contamination zones were identified. Three areas with an anomalously high content of mobile forms of lead (more than 6000 mg/kg) were identified in the soil on the territory of the industrial site of the former Vostsibelement battery factory. The content of mobile lead in the surface layer (0–20 cm) throughout the industrial site is not less than 100 mg/kg, which is 17 times higher than the maximum allowable concentration. The established excess of lead content in silverweed cinquefoil (*Potentilla anserina*) amounted to 10 background readings. A single point sample of bottom sediments of the Angara river at the entry of the industrial site, four meters from the water edge demonstrates an excess of the background content for lead, copper, zinc by 59, 12 and 4.7 times, respectively. The conducted research, analysis of the data obtained and review of the best available technologies allowed to introduce a concept for an environmentally friendly recuperative technology for the reclamation of the former Vostsibelement factory industrial site, which is very effective both from the technical and economic, and from the legal and social-ecological point of view. It also can be considered as an option to eliminate the accumulated harm of an extremely hazardous site.

Keywords: monitoring, accumulated harm, reclamation, soil, lead, recovery

For citation: Bogdanov A.V., Shkrabo A.I., Shatrova A.S. Process engineering solutions for reclamation of former Vostsibelement battery plant industrial site. *Nauki o Zemle i nedropol'zovanie = Earth sciences and subsoil use*. 2023;46(1):84-96. (In Russ.). <https://doi.org/10.21285/2686-9993-2023-46-1-84-96>.

Введение

В 2017 году был утвержден Указ Президента Российской Федерации «О стратегии экологической безопасности на период до 2025 года»¹, ставший документом стратегического планирования в области развития системы обеспечения экологической безопасности. В данном указе отмечено, что состояние окружающей среды на территории Российской Федерации оценивается как неблагоприятное. Более 300 объектов вреда, накопленного вследствие прошлой хозяйственной деятельности, являются непосредственными источниками потенциальной угрозы жизни и здоровью населения. В связи с этим в максимально короткие сроки должны быть решены задачи по ликвидации накопленного вреда окружающей среде.

Стоит отметить, что особенно остро в наше время стоит проблема загрязнения окружающей среды тяжелыми металлами. В числе прочих источниками поступления в окружающую среду таких металлов, как свинец, ртуть, мышьяк, кадмий, медь, цинк, являются предприятия аккумуляторной промышленности, коих на территории России насчитывается более 30. В Иркутской области такого рода объектом накопленного существенного вреда окружающей среде вследствие

загрязнения тяжелыми металлами является промплощадка бывшего аккумуляторного завода «Востсибэлемент», расположенная в черте муниципального образования «г. Свирск» в водоохранной зоне реки Ангары (Иркутская область, Россия) (рис. 1).

Еще в 1939 году в деревне Свирская, которая позже была преобразована в рабочий поселок, начал свою работу завод химических источников тока № 389. Со временем он был переименован в ОАО «Свирский завод "Востсибэлемент"», а с начала 2000-х годов стал носить название ООО «АкТех». В настоящее время данная компания входит в десятку наиболее крупных предприятий по количеству выпущенных свинцовых аккумуляторов [1], а также является рекордсменом по количеству торговых марок (у нее насчитывается 13 суббрендов аккумуляторных батарей) [2]. Ранее на территории промплощадки бывшего аккумуляторного завода «Востсибэлемент» располагалось три основных производства: аккумуляторное производство с изготовлением свинцово-кислотных аккумуляторов (авиационных, вагонных, мотоциклетных); изготовление гальванических элементов и батарей марганцево-цинковой системы, а также электроугольное производство с изготовлением

¹ О Стратегии экологической безопасности Российской Федерации на период до 2025 года: указ Президента РФ от 19 апреля 2017 г. № 176 [Электронный ресурс]. URL: <http://static.kremlin.ru/media/acts/files/0001201704200016.pdf> (08.12.2022).



Рис. 1. Космическая съемка расположения промплощадки бывшего аккумуляторного завода «Востсибэлемент» (космическая съемка Google)

Fig. 1. Satellite image of the location of the former Vostsibelement battery factory industrial site (Google satellite imagery)

электроуглей для элементной промышленности и киноуглей для проекционных установок. В настоящее же время на площади 33 га располагаются развалины цехов и строительный мусор (105 тыс. м³), техногенный почвогрунт, загрязненный тяжелыми металлами (110 тыс. м³), а также отходы неустановленного происхождения (20 тыс. м³) (рис. 2).

Согласно проведенным ранее обследованиям территории муниципального образования «г. Свирск», в подстилающих грунтах обнаруживаются значительные превышения предельно допустимых концентраций (ПДК) свинца (3–300 ПДК) [3], согласно Государственному докладу «О состоянии и об охране окружающей среды Российской Федерации в 2019 году»², суммарный показатель загрязнения почв в среднем составляет 48 (высоко опасный уровень загрязнения), концентрации таких тяжелых металлов, как свинец, цинк, медь и никель, существенно превышают фоновые значения и имеющиеся гигиенические нормативы. При этом среднее содержание свинца в почвах в радиусе 15 км от промплощадки бывшего аккумуляторного завода «Востсибэлемент» составляет 8 ПДК, а максимальное значение достигает 46 ПДК [4, 5]. Большое содержание свинца в почве способствует его миграции в сельскохозяйственные культуры, выращенные на дачных участках муниципального образования «г. Свирск»: так,

содержание свинца в картофеле и овощах достигало 1–6,1 ПДК [6], в овощной продукции для детского питания – 5–30 ПДК [7].

В 2021 г. сотрудниками Иркутского национального исследовательского технического университета (ИРНИТУ), а именно специалистами кафедры обогащения полезных ископаемых и охраны окружающей среды им. С.Б. Леонова, аккредитованной Лаборатории экологического мониторинга природных и техногенных сред (уникальный номер записи об аккредитации в реестре аккредитованных лиц РОСС RU.0001.518897) и Научно-исследовательского и проектного института геологии, инженерных изысканий и экологии, на основании внутреннего научно-исследовательского договора был проведен анализ более 150 образцов отходов и объектов окружающей среды, отобранных на промплощадке бывшего аккумуляторного завода «Востсибэлемент» [8].

На основании результатов обследования, полученных в ходе проведенных работ, рассчитан критерий *П*, который является численной оценкой общего влияния объекта накопленного вреда окружающей среде на состояние экологической безопасности, согласно Приказу Министерства природных ресурсов и экологии Российской Федерации от 4 августа 2017 г. № 435 «Об утверждении критериев и срока категорирования объектов, накопленный вред окружающей среде на которых

² О состоянии и об охране окружающей среды Российской Федерации в 2019 году: государственный доклад [Электронный ресурс]. URL: https://www.mnr.gov.ru/docs/gosudarstvennyye_doklady/proekt_gosudarstvennogo_doklada_o_sostoyanii_i_ob_okhrane_okruzhayushchey_sredy_rossiyskoy_federat2019/ (08.12.2022).



Рис. 2. Развалины цехов бывшего аккумуляторного завода «Востсибэлемент», 2021 г.
Fig. 2. Shop ruins of the former Vostsibэлемент battery factory, 2021

подлежит ликвидации в первоочередном порядке³. В соответствии с полученными данными и представлениями о наилучших доступных технологиях предложена концепция технологии рекультивации территории промплощадки бывшего аккумуляторного завода «Востсибэлемент».

Материалы и методы исследования

С помощью программы Surfer была построена схема распределения свинца в почве промплощадки бывшего завода «Востсибэлемент». Программное обеспечение Surfer, разработанное компанией Golden Software Inc., предназначено для построения векторных моделей на основе наблюдений в отдельных точках пространства, а также последующего анализа полученных моделей. В качестве алгоритмов интерполяции был выбран метод кригинга (*англ.*: kriging), который считается самым оптимальным и подходящим для решения большинства задач [9–11].

Основные этапы создания геостатистической модели включают:

- анализ и предварительную обработку данных (декластеризация, выявление трендов и областей пространственной неоднородности, анализ распределения, выпадающих значений, анизотропии);
- расчет значений эмпирической вариограммы или ковариации;
- построение модели вариограммы или ковариации;
- решение системы уравнений кригинга для определения весов;
- получение прогнозного значения и ошибки (неопределенности) оценки в произвольной точке области исследования (например, в узлах регулярной сетки).

Почвы с территории промплощадки «Востсибэлемент» отбирались по ГОСТ 17.4.3.01-2017 «Охрана природы. Почвы. Общие требования к отбору проб»⁴ и ГОСТ 17.4.4.02-2017 «Охрана природы. Почвы. Методы отбора и подготовки проб для химического, бактериологического, гельминтологического анализа»⁵ методом «конверта» с двух глубин: 0–5 см и 5–20 см. Было отобрано около 150 проб, которые были пронумерованы и зарегистрированы

³ Об утверждении критериев и срока категорирования объектов, накопленный вред окружающей среде на которых подлежит ликвидации в первоочередном порядке: приказ Министерства природных ресурсов и экологии Российской Федерации от 4 августа 2017 г. № 435 [Электронный ресурс]. URL: <http://publication.pravo.gov.ru/Document/View/0001201711290029> (08.12.2022).

⁴ ГОСТ 17.4.3.01-2017. Охрана природы. Почвы. Общие требования к отбору проб. Введ. 01.06.2018 г. [Электронный ресурс]. URL: http://tunadzor.ru/upload/doc/departments/298/gost_17.4.3.01-2017.pdf (08.12.2022).

⁵ ГОСТ 17.4.4.02-2017. Охрана природы. Почвы. Методы отбора и подготовки проб для химического, бактериологического, гельминтологического анализа. Введ. 17.04.2018 г. [Электронный ресурс]. URL: http://www.tunadzor.ru/upload/doc/departments/298/gost_17.4.4.02-2017.pdf (08.12.2022).



с фиксацией GPS-координат точек отбора. Образцы донных отложений были отобраны в соответствии с рекомендациями ГОСТ 17.1.5.01-80 «Охрана природы. Гидросфера. Общие требования к отбору проб донных отложений водных объектов для анализа на загрязненность»⁶ и ПНД Ф 12.1:2.2.2.3.2-03 «Методические рекомендации. Отбор проб почв, грунтов, донных отложений, илов, осадков сточных вод, шламов промышленных сточных вод, отходов производства и потребления»⁷ в четырех метрах от уреза береговой линии выше по течению Ангары относительно промплощадки бывшего завода «Востсибэлемент», глубина отбора донных отложений – 0–50 см. Точечные пробы донных отложений отбирались объемом не менее 500 мл каждая, помещались в отдельную емкость и тщательно перемешивались. Отобранные образцы объектов окружающей среды и отходов доставлялись в аккредитованную Лабораторию экологического мониторинга природных и техногенных сред ИРНИТУ, где для химического анализа их высушивали до воздушно-сухого состояния.

Количественный химический анализ отобранных проб осуществлялся в ИРНИТУ по аттестованным методикам на современном оборудовании. В связи со спецификой работы бывшего завода «Востсибэлемент» основными показателями для определения степени загрязнения являлись тяжелые металлы (свинец, медь, цинк, ртуть и др.), мышьяк, также для классификации почв выполнялось измерение водородного показателя водной и солевой вытяжек. Для оценки класса опасности отходов определялось токсическое действие на водоросли хлорелла (*Chlorella vulgaris Beijerinck*, 1890) и на дафнии (*Daphnia magna Straus*, 1820).

Подвижные формы тяжелых металлов и мышьяка, которые являются наиболее опас-

ными, так как способны мигрировать по трофической цепочке в растения и далее в организм человека [12, 13], в отобранных на территории промплощадки завода «Востсибэлемент» образцах почвы определялись методом атомно-эмиссионной спектроскопии с индуктивно-связанной аргонной плазмой на приборе ICPE-9000, для этого отобранные почвы обрабатывали ацетатно-аммонийным буферным раствором с водородным показателем 4,8, затем фильтровали полученную вытяжку через фильтр «синяя лента» и анализировали содержание тяжелых металлов в фильтрате на атомно-эмиссионном спектрометре с индуктивно-связанной плазмой ICPE-9000. Валовые формы тяжелых металлов и мышьяка определялись методом атомно-эмиссионной спектроскопии с индуктивно-связанной аргонной плазмой на приборе ICPE-9000, для чего тяжелые металлы в образцах переводили в раствор путем их растворения в смеси концентрированных кислот при высоких температурах. Определение валовых форм ртути в почве, отходах и донных отложениях осуществлялось на анализаторе ртути РА-915+ с приставкой РП-91С. Данный метод основан на атомизации содержащейся в пробе ртути в двухсекционном пиролизаторе приставки РП-91С и последующем ее определении методом беспламенной атомной абсорбции на анализаторе ртути РА-915+.

Токсическое действие на водоросли хлорелла (*Clorella vulgaris Beijer*) отходов определялось по методике ПНД Ф Т 14.1:2.3:4.10-2004 «Токсикологические методы анализа. Методика определения токсичности питьевых, природных и сточных вод, водных вытяжек из почв, осадков сточных вод и отходов производства и потребления по изменению оптической плотности культуры водоросли хлорелла (*Chlorella vulgaris Beijer*)»⁸, которая основана на регистрации различий в вели-

⁶ ГОСТ 17.1.5.01-80. Охрана природы. Гидросфера. Общие требования к отбору проб донных отложений водных объектов для анализа на загрязненность. Введ. 01.01.1982 г. [Электронный ресурс]. URL: <https://docs.cntd.ru/document/1200012787> (08.12.2022).

⁷ ПНД Ф 12.1:2.2.2.3.2-03. Методические рекомендации. Отбор проб почв, грунтов, донных отложений, илов, осадков сточных вод, шламов промышленных сточных вод, отходов производства и потребления [Электронный ресурс]. URL: <https://files.stroyinf.ru/Data2/1/4293768/4293768529.pdf> (08.12.2022).

⁸ ПНД Ф Т 14.1:2.3:4.10-2004. Токсикологические методы анализа. Методика определения токсичности питьевых, природных и сточных вод, водных вытяжек из почв, осадков сточных вод и отходов производства и потребления по изменению оптической плотности культуры водоросли хлорелла (*Chlorella vulgaris Beijer*) [Электронный ресурс]. URL: <https://e-ecolog.ru/docs/SRuWYGNjmTbtd703UОНА> (08.12.2022).



чине оптической плотности тест-культуры водоросли хлорелла, выращенной на среде, не содержащей токсических веществ (контроль), и в тестируемых пробах вод и водных вытяжек (опыт), в которых эти вещества могут присутствовать. Токсическое действие на дафнии (*Daphnia magna Straus*) отходов определялось по методике ПНД Ф Т 14.1:2.4.12-06 «Токсикологические методы анализа. Методика определения острой токсичности питьевых, пресных природных и сточных вод, водных вытяжек из почв, осадков сточных вод и отходов по смертности дафний (*Daphnia magna Straus*)»⁹, которая основана на определении смертности дафний (*Daphnia magna Straus*) при воздействии токсических веществ, присутствующих в исследуемой пробе, по сравнению с контрольной культурой в среде, не содержащей токсических веществ.

Результаты исследования

Результаты количественного химического анализа почвогрунта по основным загрязняющим компонентам промплощадки бывшего завода «Востсибэлемент» приведены в таблице. На основе данных указанной таблицы и отчета о научно-исследовательской работе в рамках хозяйственного договора № 27 от 30 октября 2021 г. «Экологический и инженерный мониторинг источников накопленного вреда промышленной площадки бывшего аккумуляторного завода «Востсибэлемент» муниципального образования «г. Свирск» и составление укрупненной сметы к выполнению инженерных изысканий»¹⁰ построена схема распределения свинца в почве промышленной площадки и выполнена оценка критерия П (Приказ Министерства природных ресурсов и экологии Российской Федерации от 4 августа 2017 г. № 435 «Об утверждении критериев и

срока категорирования объектов, накопленный вред окружающей среде на которых подлежит ликвидации в первоочередном порядке»¹¹).

Рассчитанный критерий П складывается из следующих пунктов:

1. Объем компонента природной среды, содержание загрязняющих веществ в котором превышает установленное значение норматива качества окружающей среды, млн м³ = 0.

2. Масса размещенных отходов производства и потребления конкретного класса опасности, млн т = 0,6 (строительный мусор – 100 тыс. м³ (IV класс опасности); почвогрунт (0–0,5 м) – 110 тыс. м³ (III и IV классы опасности); неустановленные промышленные отходы различного происхождения – 20 тыс. м³ (III класс опасности)).

3. Площадь территории (акватории), подверженной негативному воздействию (на которой расположен объект накопленного вреда окружающей среде), га = 0,6.

4. Уровень и объем негативного воздействия на окружающую среду, оценивающиеся в зависимости от превышения предельно допустимых концентраций химических веществ, содержащихся в водах водных объектов, атмосферном воздухе, почве = 0,75 (превышение нормативных значений ориентировочно допустимых концентраций по кобальту в 2,2–7,5 раза, никелю – в 2,1–7,2 раза, меди – в 1,1–23 раза, цинку – в 1,7–166 раз, мышьяку – в 6,1–60 раз, ртути – в 1,1–3,2 раза, свинцу – в 1,3–13862 раза, предельно допустимых концентраций (подвижные формы) по никелю – до 7,9 раза, меди – в 1,3–81 раз, цинку – в 1,3–21 раз, свинцу – в 3,5–1733 раза; суммарный показатель загрязнения Zc > 128, что свидетельствует о чрезвычайно опасной категории химического загрязнения почв).

⁹ ПНД Ф Т 14.1:2.4.12-06. Токсикологические методы анализа. Методика определения острой токсичности питьевых, пресных природных и сточных вод, водных вытяжек из почв, осадков сточных вод и отходов по смертности дафний (*Daphnia magna Straus*) [Электронный ресурс]. URL: <https://files.stroyinf.ru/Data2/1/4293772/4293772638.pdf> (08.12.2022).

¹⁰ Экологический и инженерный мониторинг источников накопленного вреда промышленной площадки бывшего аккумуляторного завода «Востсибэлемент» муниципального образования «г. Свирск» и составление укрупненной сметы к выполнению инженерных изысканий: отчет о выполненной работе по договору № 27 от 30.10.2021 г. [Электронный ресурс]. URL: <https://svirsk.ru/wp-content/uploads/2022/12/Отчет-по-мониторингу-промплощадки-ВСЭ-ИрНИТУ-2021-год.pdf> (08.12.2022).

¹¹ Об утверждении критериев и срока категорирования объектов, накопленный вред окружающей среде на которых подлежит ликвидации в первоочередном порядке: приказ Министерства природных ресурсов и экологии Российской Федерации от 4 августа 2017 г. № 435 [Электронный ресурс]. URL: <http://publication.pravo.gov.ru/Document/View/0001201711290029> (08.12.2022).



Результаты количественного химического анализа почвогрунта по основным загрязняющим компонентам промплощадки бывшего завода «Востсибэлемент»
Results of the quantitative chemical analysis of soils for the main contaminating components of the former Vostsibelement factory industrial site

Номер пробы	Координаты отбора	Глубина отбора, см	Показатель, мг/кг (норматив)				
			Свинец подвижный (ПДК = 6)	Медь подвижная (ПДК = 3)	Цинк подвижный (ПДК = 23)	Мышьяк валовый (ПДК = 2)	Ртуть валовая (ПДК = 2,1)
179	53.087489, 103.352277	0–5	321	0,9	65,5	11,4	0,9
180	53.087495, 103.353730	0–5	1850	6,8	151	18,7	2,4
180	53.087495, 103.353730	60–80	95,1	2,6	12,5	9,6	0,15
181	53.088190, 103.352341	0–20	562	1,2	31,1	12,4	0,16
183	53.089691, 103.356359	0–5	1023	3,6	132	10	4,6
183	53.089691, 103.356359	5–20	665	3,9	164	22	2,3
183	53.089691, 103.356359	20–60	148	3	31,6	40	0,49
183	53.089691, 103.356359	150	31	1	7,6	7,2	0,3
186	53.093226, 103.354197	0–20	131	1,6	8,9	21,3	0,13
188	53.093340, 103.352456	0–20	111	0,9	10,1	14,5	0,031
198*	53.086043, 103.358341	0–20	9,4	0,3	4,7	9,4	0,01
190	53.088465, 103.353637	0–20	1750	5,4	136	19,2	1,2
192	53.089844, 103.354087	0–20	671	3,1	125	12,3	0,74
193	53.090939, 103.355643	0–20	996	2,9	146	11	2,7
194	53.090997, 103.354141	0–20	503	2,2	138	10,2	1,1
195	53.091268, 103.352714	0–20	215	2,8	54,1	10,7	0,36
196	53.092299, 103.354012	0–20	201	3,4	24,5	13,2	0,25
197	53.092370, 103.352531	0–20	112	3,1	27,7	12,5	0,12
182	53.087423, 103.356273	0–20	325	2,3	6,9	21,8	0,16
184	53.089184, 103.352282	0–20	1170	2,2	6,5	18,6	0,037
185	53.089479, 103.352322	0–20	8920	244	79,5	22,4	0,39
187	53.093173, 103.356104	0–20	10400	55,6	285	29,6	0,71
189	53.092264, 103.356308	0–5	4580	113	476	19,6	1,9
191	53.088478, 103.356351	0–20	350	4,1	21,5	11,3	0,33

Примечание. * Разовая точечная проба, отобранная в берегоохранной зоне в двух метрах от уреза береговой линии напротив границы территории промплощадки бывшего завода «Востсибэлемент».



5. Наличие на объектах накопленного вреда окружающей среде опасных веществ, указанных в международных договорах, одной из сторон которых является Российская Федерация = 0,1 (свинец – 1056 т, цинк – 222 т, мышьяк – 12,7 т, медь – 73,8 т).

6. Количество населения, проживающего на территории, окружающая среда которой испытывает негативное воздействие объекта накопленного вреда окружающей среде, тыс. чел. = 0,6 (12 тыс. чел.).

7. Количество населения, проживающего на территории, окружающая среда которой находится под угрозой негативного воздействия вследствие расположения объекта накопленного вреда окружающей среде, тыс. чел. = 0,4 (12 тыс. чел.).

Следовательно, критерий Π можно рассчитать следующим образом:

$$\Pi = 0 + 0,6 + 0,6 + 0,75 + 0,1 + 0,6 + 0,4 = 3,05.$$

На основе данных количественного химического анализа, приведенных в таблице, с применением программного обеспечения Surfer была построена схема распределения подвижных форм свинца в почве промплощадки бывшего аккумуляторного завода «Востсибэлемент» (рис. 3).

Как видно из рис. 3, в почве на территории промплощадки бывшего аккумуляторного завода «Востсибэлемент» было выявлено три участка с аномально большим содержанием подвижных форм свинца (более 6000 мг/кг). Первый участок расположен в точке 185. Он включает в себя аккумуляторное производство – цех № 2 по изготовлению свинцово-кислотных аккумуляторов (позиция 9). Второй участок размещается в точке 187. Это крайний

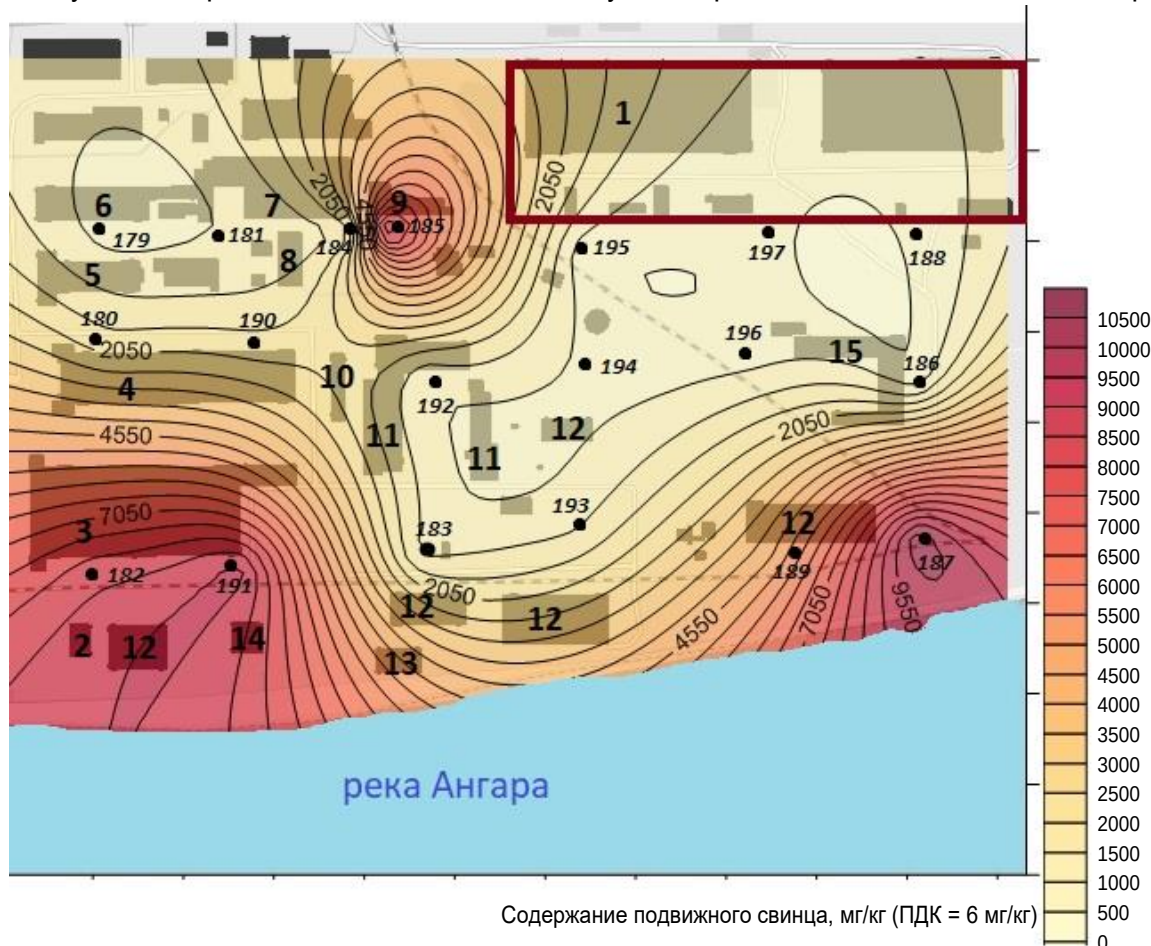


Рис. 3. Схема распределения подвижного свинца в почве промплощадки бывшего аккумуляторного завода «Востсибэлемент»:

1 – действующее предприятие ООО «АкТех»; 2–15 – развалины цехов промплощадки бывшего аккумуляторного завода «Востсибэлемент»; ●179 – точки отбора проб

Fig. 3. Diagram of mobile lead distribution in the soil of former Vostsibelement battery factory industrial site:

1 – operating company AkTex (Automotive Batteries); 2–15 – shop ruins of former Vostsibelement battery factory industrial site; ●179 – sampling points



правый по течению Ангары участок промплощадки, протягивающийся вдоль береговой линии (позиция 12). Третий участок располагается в точках 182 и 191 в начале промплощадки по течению реки (позиции 3, 12 и 14). При этом на всей территории промплощадки содержание подвижного свинца в поверхностном слое (0–20 см) не опускается ниже 100 мг/кг, что выше ПДК в 17 раз. Было установлено превышение содержания свинца в лапчатке гусиной (*Potentilla anserina*), которое составило 10 фоновых значений, а также превышение фонового содержания в разовой точечной пробе донных отложений реки Ангары в начале промплощадки, в четырех метрах от уреза береговой линии по свинцу, меди, цинку в 59, 12 и 4,7 раза соответственно.

В Государственном реестре объектов накопленного вреда окружающей среде Российской Федерации по состоянию на 2021 год в Иркутской области поставлено на учет два аналогичных объекта:

- объект негативного воздействия отходов, накопленных в процессе деятельности Байкальского целлюлозно-бумажного комбината, с критерием П, равным 2,25;

- территория, на которой в прошлом осуществлялась экономическая деятельность, связанная с производством химических веществ и химических продуктов на территории городского округа г. Усолье-Сибирское, с критерием П, равным 3,55¹².

Как видно из приведенных данных, объект накопленного вреда промплощадки бывшего завода «Востсибэлемент» с критерием П, равным 3,05, соразмерен по своему негативному воздействию с указанными объектами, потому должен подлежать ликвидации в первоочередном порядке.

На основании полученных данных и представлений о наилучших доступных технологиях (ГОСТ Р57446-2017 «Наилучшие доступные технологии. Рекультивация нарушенных земель и земельных участков. Восстановле-

ние биологического разнообразия»¹³) была предложена концепция технологии рекультивации промплощадки «Востсибэлемент», в основу которой заложены следующие основные этапы технологических решений:

Первый этап: разборка строений и выемка фундаментов IV класса опасности объемом 105 тыс. м³ с применением специальной строительной техники; разделка фрагментов сооружений с извлечением арматуры до кусков крупности, используемых при дорожно-строительных и других возможных типах работ (заполнение выемок карьеров, рельефа и т. п.); отправление арматуры на вывоз и сдачу в качестве вторсырья.

Второй этап: разделка специальных строительных и оставшихся гидротехнических сооружений промплощадки III класса опасности (не более 10 % от общего объема отходов IV класса опасности).

Третий этап: перемещение разделенных строительных отходов IV класса опасности и размещение их на подготовленной площадке временного хранения отходов площадью около 1 га (временная площадка должна быть оптимально расположена на территории промплощадки бывшего завода «Востсибэлемент», но находиться за пределами водоохранной зоны и иметь санитарно-защитную зону, не охватывающую жилые строения).

Четвертый этап: доставка разделенных строительных отходов III класса опасности, отходов, присущих для аккумуляторного производства и других различных отходов II и III классов опасности и складирование их на Ангарском полигоне промышленных отходов в объеме, возможном для их приема.

Пятый этап: техническая рекультивация земель, которая заключается, в частности, в специальной переработке установленных зон очагов загрязнения грунтов III класса опасности (до 25 % от общей площади) и объема грунтов IV класса опасности, который составляет около 110 тыс. м³:

¹² Сведения, содержащиеся в государственном реестре объектов накопленного вреда окружающей среде (по состоянию на 07.05.2021) [Электронный ресурс]. URL: https://www.mnr.gov.ru/docs/docs/svedeniya_soderzhashchiesya_v_gosudarstvennom_reestre_obektov_nakoplenного_vreda_okruzhayushchey_sre2/ (08.12.2022).

¹³ ГОСТ Р57446-2017. Наилучшие доступные технологии. Рекультивация нарушенных земель и земельных участков. Восстановление биологического разнообразия. Введ. 01.12.2017 г. [Электронный ресурс]. URL: <https://docs.cntd.ru/document/1200145085> (08.12.2022).



– сбор и отделение металлических отходов, состоящих из фрагментов аккумуляторных решеток, металлического свинца, железа, меди и т. п. на спецоборудовании (грохот, магнитная сепарация и др.) на площадке временного хранения;

– отделение из грунтов III класса опасности частиц металлического свинца на спецоборудовании (грохот, воздушная сепарация и др.) на площадке временного хранения;

– вывоз на сдачу отделенных металлических отходов свинца, железа и других металлов в качестве вторсырья или их плавка в мобильных металлургических печах на площадках временного хранения с получением товарной продукции;

– завершающий этап технической рекультивации земель промплощадки – планировка, складирование и т. д.

Шестой этап: биологическая рекультивация при помощи растений-фиторе медиантов в два-три этапа с использованием площадки временного хранения отходов (силосная яма и др.).

Седьмой этап: рекультивация площадки временного хранения отходов с передачей всех рекультивированных земель муниципалитету муниципального образования «г. Свирск» с назначением лесопосадки.

Стоит отметить, что существует несколько основных направлений по ремедиации земель, которые загрязнены тяжелыми металлами, таких как культивирование устойчивых к загрязнению культурных и дикорастущих растений; проведение фиторекультивации с помощью растений, способных накапливать тяжелые металлы в вегетативных органах, регулирование подвижности тяжелых металлов в почве с применением сорбентов, создание рекультивационного слоя¹⁴ [14, 15]. На наш

взгляд, одним из наиболее эффективных методов рекультивации земель, загрязненных тяжелыми металлами, является регулирование подвижности данных металлов в почве с использованием сорбентов. Сорбционными свойствами по отношению к тяжелым металлам обладают органические вещества, в связи с чем с этой целью могут применяться такие различные искусственные и природные сорбенты, как низовой торф, черноземы, глины, вермикулит [16–18]. При этом в качестве альтернативы технологии биологической рекультивации (шестого этапа) может быть применено техническое решение по использованию в качестве почвогрунта-сорбента вымороженного осадка шлам-лигнина карт-накопителей ОАО «Байкальский целлюлозно-бумажный комбинат» [19–21].

Заключение

Таким образом, по представленным в статье результатам можно сделать заключение о том, что промышленная площадка бывшего завода «Востсибэлемент» является источником накопленного вреда, а также крайне экологически опасным объектом в связи со своим расположением в черте муниципального образования «г. Свирск» и водоохраной зоны реки Ангары, представляющим потенциальную угрозу всей территории верхней части Братского водохранилища.

Предлагаемые технологические решения рекультивации промышленной площадки бывшего завода «Востсибэлемент», на наш взгляд, являются весьма эффективными как с технико-экономической, так и с правовой и социально-экологической точки зрения и могут быть рассмотрены в качестве вариантов ликвидации накопленного вреда крайне опасного объекта.

Список источников

1. Данилов А.А. Состояние рынка аккумуляторной промышленности // Управление экономическими системами: электронный научный журнал. 2014. № 10. С. 43 [Электронный ресурс]. URL: https://www.elibrary.ru/download/elibrary_23307799_81917550.pdf (08.12.2022).
2. Добринова Т.В., Харланова В.Н., Реутова Ю.И. Состояние и тенденции развития внешнеэкономиче-

ской деятельности предприятий аккумуляторной промышленности // Вестник Алтайской академии экономики и права. 2019. № 1-1. С. 45–50.

3. Михайлова О.С., Булаева Н.М., Мусихина Е.А. Мониторинг загрязнения тяжелыми металлами почвенного покрова территории города Свирска // Мониторинг. Наука и технологии. 2014. № 4. С. 34–40.

¹⁴ Голованов А.И., Зимин Ф.М., Сметанин В.И. Рекультивация нарушенных земель: учебник для студентов вузов. СПб.: Лань, 2015. 326 с.



4. Янин Е.П. Эколого-геохимические аспекты воздействия аккумуляторной промышленности на окружающую среду // Ресурсосберегающие технологии. 2002. № 18. С. 3–33.
5. Янин Е.П. Электротехническая промышленность и окружающая среда (эколого-геохимические аспекты). М.: Диалог-МГУ, 1998. 281 с.
6. Гордеева О.Я., Белоголова Г.А., Гребенщикова В.И. Распределение и миграция тяжелых металлов и мышьяка в системе почва – растение в условиях г. Свирска (Южное Прибайкалье) // Проблемы региональной экологии. 2010. № 3. С. 108–113.
7. Бутырин М.В., Замашников Р.В., Хуснидинов Ш.К. Оценка степени загрязнения природной среды, сельскохозяйственных растений и показатели здоровья населения г. Свирска Иркутской области // Вестник ИРГСХА. 2015. № 67. С. 17–24.
8. Богданов А.В., Шатрова А.С., Тюкалова О.В. Оценка воздействия промплощадки бывшего аккумуляторного завода «Востсибэлемент» Иркутской области на объекты окружающей среды // Экология и промышленность России. 2022. Т. 26. № 3. С. 52–57. <https://doi.org/10.18412/1816-0395-2022-3-52-57>.
9. Cressie N. The origins of kriging // Mathematical Geology. 1990. Vol. 22. P. 239–252. <https://doi.org/10.1007/BF00889887>.
10. Новикова А.М., Котолупова А.А. Об опыте использования метода кригинга в программах Surfer и QGIS для морских климатических исследований // Системы контроля окружающей среды. 2016. № 6. С. 59–67.
11. Кошель С.М., Мусин О.Р. Методы цифрового моделирования: кригинг и радиальная интерполяция // Информационный бюллетень ГИС-Ассоциации. 2001. № 2(29)-3(30). С. 23–24.
12. Медведев И.Ф., Деревягин С.С. Тяжелые металлы в экосистемах: монография. Саратов: Ракурс, 2017. 178 с.
13. Бабкин В.В., Завалин А.Л. Физиолого-биохимические аспекты действия тяжелых металлов на растения // Химия в сельском хозяйстве. 1995. № 5. С. 17–21.
14. Radočaj D., Velić N., Jurišić M., Merdić E. The remediation of agricultural land contaminated by heavy metals // Poljoprivreda. 2020. Vol. 26. No. 3. S. 30–42. <https://doi.org/10.18047/poljo.26.2.4>.
15. Сорокин Н.Д. Рекультивация нарушенных и загрязненных земель. СПб.: Знание, 2016. 404 с.
16. Abollino O., Giacomino A., Malandrino M., Mentasti E. The efficiency of vermiculite as natural sorbent for heavy metals. Application to a contaminated soil // Water, Air, and Soil Pollution. 2007. Vol. 181. P. 149–160. <https://doi.org/10.1007/s11270-006-9286-8>.
17. Yang F., Wang B., Shi Z., Li L., Li Y., Mao Z., et al. Immobilization of heavy metals (Cd, Zn, and Pb) in different contaminated soils with swine manure biochar // Environmental Pollutants and Bioavailability. 2021. Vol. 33. Iss. 1. P. 55–65. <https://doi.org/10.1080/26395940.2021.1916407>.
18. Taylor R.P., Jones C.L.W., Laubscher R.K. Agricultural fertiliser from brewery effluent – the recovery of nutrients from the biomass of activated sludge and high rate algal pond treatment systems // Water Supply. 2021. Vol. 21. Iss. 5. P. 1939–1952. <https://doi.org/10.2166/ws.2020.256>.
19. Богданов А.В., Федотов К.В., Шатрова А.С. Разработка научно-технических основ для экологически безопасной утилизации накопленных отходов целлюлозно-бумажной промышленности Байкальского региона: монография. Иркутск: ООО «Глазковская типография», 2020. 187 с.
20. Шатрова А.С., Богданов А.В., Шкрабо А.И., Алексеева О.В. Технология переработки отходов целлюлозно-бумажной промышленности в почвогрунты с использованием естественных природных процессов // Известия Томского политехнического университета. Инжиниринг георесурсов. 2022. Т. 333. № 8. С. 153–162. <https://doi.org/10.18799/24131830/2022/8/3658>.
21. Bogdanov A.V., Shatrova A.S., Darmaeva L.B., Shkrabo A.I. The use of pulp and paper industry waste as soil for recultivation of disturbed lands // IOP Conference. Series: Earth and Environmental Science. 2021. Vol. 667. P. 052005. <https://doi.org/10.1088/1755-1315/677/5/052005>.

References

1. Danilov A.A. The state of the battery industry market. *Upravlenie ekonomicheskimi sistemami: elektronnyi nauchnyi zhurnal*. 2014;10:43. Available from: https://www.elibrary.ru/download/elibrary_23307799_81917550.pdf [Accessed 8th August 2022]. (In Russ.).
2. Dobrinova T.V., Kharlanova V.N., Reutova Yu.I. State and development trends of foreign economic activity of battery industry enterprises. *Vestnik Altaiskoi akademii ekonomiki i prava*. 2019;1-1:45-50. (In Russ.).
3. Mikhailova O.S., Bulaeva N.M., Musikhina E.A. Heavy metal pollution monitoring of soil cover for Svirsk town. *Monitoring. Nauka i tekhnologii*. 2014;4:34-40. (In Russ.).
4. Yanin E.P. State and development trends of foreign economic activity of battery industry enterprises. *Resurso-sberegayushchie tekhnologii*. 2002;18:3-33. (In Russ.).
5. Yanin E.P. *Electrical engineering industry and environment (ecological and geochemical aspects)*. Moscow: Dialog-MGU; 1998. 281 p. (In Russ.).
6. Gordeeva O.Ya., Belogolova G.A., Grebenshchikova V.I. Distribution and migration of heavy metals and arsenic in "soil – plant" system in Svirsk town conditions (the Southern Baikal region). *Problemy regional'noi ekologii = Regional Environmental Issues*. 2010;3:108-113. (In Russ.).
7. Butyrin M.V., Zamashchikov R.V., Khusnidinov Sh.K. Evaluation of environmental pollution rate of agricultural plants and public health indexes of Svirsk in Irkutsk region. *Vestnik IrGSHA*. 2015;67:17-24. (In Russ.).
8. Bogdanov A.V., Shatrova A.S., Tyukalova O.V. Impact Assessment of the industrial site at former battery plant "Vostsibelement" in Irkutsk region on environmental compartment. *Ekologiya i promyshlennost' Rossii = Ecology and Industry of Russia*. 2022;26(3):52-57. (In Russ.). <https://doi.org/10.18412/1816-0395-2022-3-52-57>.
9. Cressie N. The origins of kriging. *Mathematical Geology*. 1990;22:239-252. <https://doi.org/10.1007/BF00889887>.
10. Novikova A.M., Kotolupova A.A. The experience of



using kriging method in the programmes Surfer and QGIS for marine climate research. *Sistemy kontrolya okruzhayushchej sredy = Monitoring systems of environment*. 2016; 6:59–67. (In Russ.).

11. Koshel' S.M., Musin O.R. Digital modeling methods: kriging and radial interpolation. *Informatsionnyi byulleten' GIS-Assotsiatsii = Informational Bulletin of GIS-Association*. 2001;2(29)-3(30):23-24. (In Russ.).

12. Medvedev I.F., Derevyagin S.S. *Heavy metals in ecosystems*. Saratov: Rakurs; 2017. 178 p. (In Russ.).

13. Babkin V.V., Zavalin A.L. Physiological and biochemical aspects of heavy metals action on plants. *Khimiya v sel'skom khozyaistve*. 1995;5:17-21. (In Russ.).

14. Radočaj D., Velić N., Jurišić M., Merdić E. The remediation of agricultural land contaminated by heavy metals. *Poljoprivreda*. 2020;26(3):30-42. <https://doi.org/10.18047/poljo.26.2.4>.

15. Sorokin N.D. *Reclamation of disturbed and contaminated soils*. Saint Petersburg: Znanie; 2016. 404 p. (In Russ.).

16. Abollino O., Giacomino A., Malandrino M., Mentasti E. The efficiency of vermiculite as natural sorbent for heavy metals. Application to a contaminated soil. *Water, Air, and Soil Pollution*. 2007;181:149-160. <https://doi.org/10.1007/s11270-006-9286-8>.

17. Yang F., Wang B., Shi Z., Li L., Li Y., Mao Z., et al. Immobilization of heavy metals (Cd, Zn, and Pb) in dif-

ferent contaminated soils with swine manure biochar. *Environmental Pollutants and Bioavailability*. 2021;33(1):55-65. <https://doi.org/10.1080/26395940.2021.1916407>.

18. Taylor R.P., Jones C.L.W., Laubscher R.K. Agricultural fertiliser from brewery effluent – the recovery of nutrients from the biomass of activated sludge and high rate algal pond treatment systems. *Water Supply*. 2021;21(5): 1939-1952. <https://doi.org/10.2166/ws.2020.256>.

19. Bogdanov A.V., Fedotov K.V., Shatrova A.S. *Elaboration of scientific and technical foundations for environmentally safe disposal of accumulated pulp and paper industry waste in the Baikal region*. Irkutsk: Glazkovskaya tipografiya; 2020. 187 p. (In Russ.).

20. Shatrova A.S., Bogdanov A.V., Shkrabo A.I., Alekseeva O.V. Technology for processing waste of the pulp and paper industry into soil ground using natural processes. *Izvestiya Tomskogo politekhnicheskogo universiteta. Inzhiniring georesursov = Bulletin of the Tomsk Polytechnic University. Geo Assets Engineering*. 2022;333(8):153-162. (In Russ.). <https://doi.org/10.18799/24131830/2022/8/3658>.

21. Bogdanov A.V., Shatrova A.S., Darmaeva L.B., Shkrabo A.I. The use of pulp and paper industry waste as soil for recultivation of disturbed lands. *IOP Conference Series: Earth and Environmental Science*. 2021;667: 052005. <https://doi.org/10.1088/1755-1315/677/5/052005>.

Информация об авторах / Information about the authors

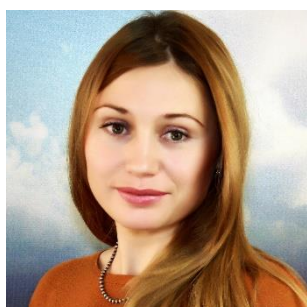


Богданов Андрей Викторович,

доктор технических наук, профессор,
профессор кафедры обогащения полезных ископаемых
и охраны окружающей среды им. С.Б. Леонова,
Институт недропользования,
Иркутский национальный исследовательский технический университет,
г. Иркутск, Россия,
bogdanovav@istu.edu
<https://orcid.org/0000-0002-7519-1126>

Andrey V. Bogdanov,

Dr. Sci. (Eng.), Professor,
Professor of the Department of Mineral Processing and Environmental
Protection named after S.B. Leonov,
Institute of Subsoil Use,
Irkutsk National Research Technical University,
Irkutsk, Russia,
bogdanovav@istu.edu
<https://orcid.org/0000-0002-7519-1126>



Шкрабо Анна Ивановна,

научный сотрудник Лаборатории экологического мониторинга
природных и техногенных сред,
Институт недропользования,
Иркутский национальный исследовательский технический университет,
г. Иркутск, Россия,
bogdanov.lab@istu.edu
<https://orcid.org/0000-0002-2018-3751>

Anna I. Shkrabo,

Researcher of the Laboratory for Ecological Monitoring
of Natural and Technogenic Environments,
Institute of Subsoil Use,
Irkutsk National Research Technical University,



Irkutsk, Russia,
✉ bogdanov.lab@istu.edu
<https://orcid.org/0000-0002-2018-3751>



Шатрова Анастасия Сергеевна,
кандидат технических наук,
научный сотрудник Лаборатории экологического мониторинга
природных и техногенных сред,
Институт недропользования,
Иркутский национальный исследовательский технический университет,
г. Иркутск, Россия,
shatrova.irk@gmail.com
<https://orcid.org/0000-0001-8054-1680>

Anastasiya S. Shatrova,
Cand. Sci. (Eng.),
Researcher of the Laboratory for Ecological Monitoring
of Natural and Technogenic Environments,
Institute of Subsoil Use,
Irkutsk National Research Technical University,
Irkutsk, Russia,
shatrova.irk@gmail.com
<https://orcid.org/0000-0001-8054-1680>

Вклад авторов / Contribution of the authors

Все авторы сделали эквивалентный вклад в подготовку публикации.
The authors contributed equally to this article.

Конфликт интересов / Conflict of interests

Авторы заявляют об отсутствии конфликта интересов.
The authors declare no conflicts of interests.

Все авторы прочитали и одобрили окончательный вариант рукописи.
The final manuscript has been read and approved by all the co-authors.

Информация о статье / Information about the article

Статья поступила в редакцию 13.01.2023; одобрена после рецензирования 30.01.2023; принята к публикации 14.02.2023.

The article was submitted 13.01.2023; approved after reviewing 30.01.2023; accepted for publication 14.02.2023.



ГИПОТЕЗЫ, СООБЩЕНИЯ, ДИСКУССИИ

Научная статья

УДК 550.423+550.424+553.3+553.6

<https://doi.org/10.21285/2686-9993-2023-46-1-97-124>



Химические элементы, минералы и горные породы в единой объемной модели

М.М. Лабушев^a, Т.М. Лабушев^b, А.Н. Хохлов^c

^aСибирский федеральный университет, г. Красноярск, Россия

^bНациональный исследовательский университет ИТМО, г. Санкт-Петербург, Россия

^cООО «Геоэкономика», г. Красноярск, Россия

Резюме. Целью проведенного исследования являлась детализация предложенной ранее единой объемной модели позиционирования химических элементов, минералов и горных пород в земной коре, выработка терминологии для ее описания и характеристика системных свойств модели. Методы исследования включали логико-математический анализ модели на основе атомных весов химических элементов, их валентностей и электроотрицательности, а также атомных весов химических элементов в составе минералов с расчетом показателей многомерной пропорциональности каждой из указанных характеристик. Эти методы были использованы для дальнейшего развития высказанного ранее предположения о том, что минералы по возрастанию показателя многомерной пропорциональности атомных весов химических элементов в своем составе располагаются в объемной модели так же, как по возрастанию атомных весов в такой модели располагаются химические элементы. Горные породы, как и минералы, располагаются в порядке возрастания значений этого показателя, при этом горная порода по показателю многомерной пропорциональности соответствует определенному минералу. В результате исследования выполнен общий анализ системных свойств вертикальных пространственных групп химических элементов модели, эти группы разделены на два типа в зависимости от присутствия газа или твердого химического элемента в первой позиции. Изучены закономерности изменения валентностей и электроотрицательности химических элементов в таких пространственных группах, выполнены анализы многомерных данных для элементов этих групп. Сделан расчет значений многомерного показателя для первых 760 минералов с использованием программы Agemarker с открытым кодом. Анализ многомерных данных подтверждает разделение групп на два типа. По результатам анализа их взаимного расположения предположено существование газовых каналов миграции химических элементов. Определены возможные пути миграции химических элементов в объемной модели при образовании некоторых минералов. Рассмотрено взаимное расположение некоторых месторождений для подтверждения пространственных характеристик объемной модели. Предложена новая парадигма геологических исследований, заключающаяся в позиционировании минералов и горных пород в объемной модели и определении возможных путей миграции химических элементов при образовании минералов и горных пород.

Ключевые слова: объемная модель, периодическая система, химические элементы, минералы, горные породы, информационный коэффициент пропорциональности, показатель многомерной пропорциональности, миграция химических элементов

Для цитирования: Лабушев М.М., Лабушев Т.М., Хохлов А.Н. Химические элементы, минералы и горные породы в единой объемной модели // Науки о Земле и недропользование. 2023. Т. 46. № 1. С. 97–124. <https://doi.org/10.21285/2686-9993-2023-46-1-97-124>.

HYPOTHESES, REPORTS, DISCUSSIONS

Original article

Chemical elements, minerals and rocks in a single three-dimensional model

Mikhail M. Labushev^a, Timofei M. Labushev^b, Aleksandr N. Khokhlov^c

^aSiberian Federal University, Krasnoyarsk, Russia

^bITMO University, Saint Petersburg, Russia

^cGeoeconomics LLC, Krasnoyarsk, Russia

© Лабушев М.М., Лабушев Т.М., Хохлов А.Н., 2023



Abstract. The purpose of the study is refining of the proposed earlier unified three-dimensional model for the positioning of chemical elements, minerals, and rocks in the earth's crust, as well as working out its description terminology and model system properties specification. The research methods included the logical and mathematical analysis of the model based on atomic weights of chemical elements, their valences and electronegativity, as well as on the atomic weights of chemical elements present in the composition of minerals and calculation of multidimensional proportionality indexes for each of given characteristics. The methods were used for further development of the previously introduced assumption that within the three-dimensional model minerals are arranged in the ascending order of the index of multidimensional proportionality of atomic weights of chemical elements in their composition, similarly to the way the chemical elements are positioned in the model according to the increase of their atomic weights. Both rocks and minerals are arranged in the ascending order of this index, whereas rocks correspond to a certain mineral in terms of the multidimensional proportionality index. As a result of the study, a general analysis of the system properties of vertical spatial groups of chemical elements of the model was carried out with groups being divided into two types depending on the presence of a gas or a solid chemical element in the first position. The variation patterns of chemical element valencies and electronegativity were studied in these spatial groups. Also, the analyses of multidimensional data were performed for the elements of these groups. The values of the multidimensional index were calculated for the first 760 minerals using the Agemarker open source program. The analysis of multivariate data confirmed the division of groups into two types. Having analyzed their mutual arrangement, the authors suggested the existence of gas channels of chemical element migration and determined possible migration paths of chemical elements in the three-dimensional model under the formation of some minerals. The relative position of some fields was considered in order to confirm the spatial characteristics of the three-dimensional model. The authors have introduced a new paradigm of geological research positioning minerals and rocks in a three-dimensional model and determining possible migration paths of chemical elements when minerals and rocks are formed.

Keywords: three-dimensional model, periodic system, chemical elements, minerals, rocks, information coefficient of proportionality, index of multidimensional proportionality, migration of chemical elements

For citation: Labushev M.M., Labushev T.M., Khokhlov A.N. Chemical elements, minerals and rocks in a single three-dimensional model. *Nauki o Zemle i nedropol'zovanie = Earth sciences and subsoil use*. 2023;46(1):97-124. (In Russ.). <https://doi.org/10.21285/2686-9993-2023-46-1-97-124>.

Введение

Периодическая система химических элементов в основном представляется в двух измерениях, тем не менее данный вопрос до сих пор является открытым [1]. Объемные представления системы известны еще со времен А. де Шанкуртуа и в последнее время получили новое развитие [2, 3]. В данной работе предлагается объемная модель системы минералов и горных пород в виде условного куба (кубоида) с вакансией в первой позиции (далее – объемная модель или кубоид) (рисунок).

Ранее такая модель была предложена для химических элементов [4] с указанием на возможность ее применения для систематизации минералов и горных пород. На ее основе, например, было дано общее объяснение существования месторождений так называемой пятиэлементной формации.

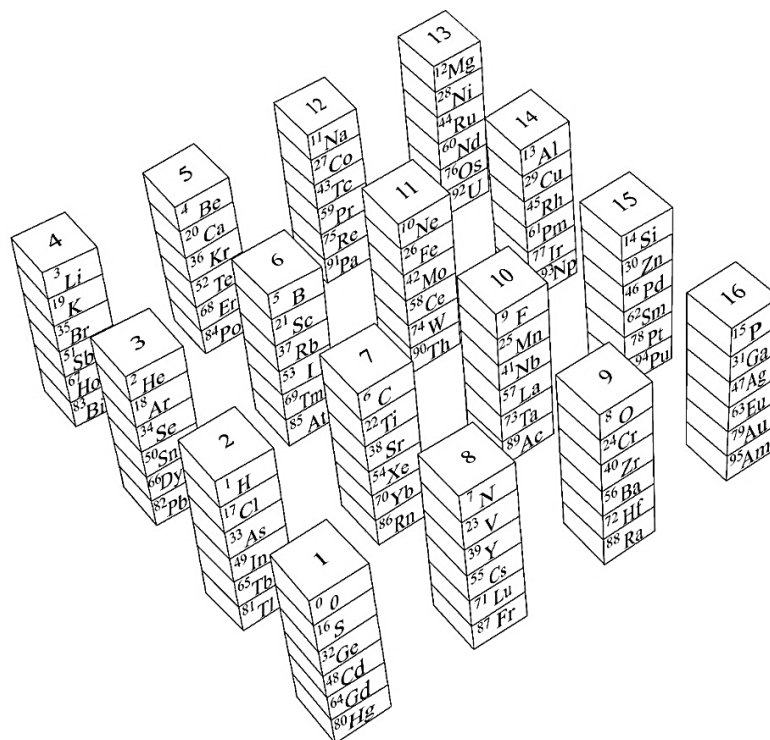
Данный кубоид предлагается использовать для выявления закономерностей совместного нахождения минералов и горных пород в земной коре. При этом принимается, что каждая горная порода по среднему значению I_{av} массива симметризованных информационных коэффициентов пропорциональности I_p атомных весов [5, 6] – основному показателю многомерной пропорциональности атомных

весов – ассоциируется с показателем, присущим определенному минералу [7], а тот, в свою очередь, сопоставляется с местом расположения в модели одного из первых 95 химических элементов периодической системы.

Информативность показателя I_{av} была косвенно проверена обнаружением в природе бинарных масс «твердые – газообразные химические элементы» [8]. При использовании предлагаемой модели наши представления о закономерностях распределения минералов и горных пород в земной коре могут быть существенно расширены.

Целью проведенного исследования являлась детализация предложенной ранее единой объемной модели позиционирования химических элементов, минералов и горных пород в земной коре, выработка терминологии для ее описания и характеристика некоторых системных свойств модели с прицелом на ее незамедлительное практическое использование с применением единой терминологии.

Все расчеты подтверждают сделанное ранее предположение об универсальности рассматриваемой объемной модели, уточняют позиционирование в кубоиде первых 95 минералов и впервые устанавливают позиции еще 665 минералов.



*Кубоид с пронумерованными вертикальными пространственными группами
и порядковыми номерами химических элементов*
Cuboid with numbered vertical space groups and atomic numbers of chemical elements

Материалы и методы исследования

Основным методом исследований являлся логико-математический анализ модели на основе атомных весов химических элементов, их валентностей и электроотрицательности, а также атомных весов химических элементов в составе минералов с расчетом показателей многомерной пропорциональности каждой из указанных характеристик в программе Agemarker с открытым кодом.

Была использована база данных Международной минералогической ассоциации (англ.: International Mineralogical Association, IMA), которая на момент начала расчетов включала информацию о 5704 минералах. Атомные веса для всех расчетов были приняты по данным Комиссии по содержанию изотопов и атомным весам Международного союза теоретической и прикладной химии (англ.: Commission on Isotopic Abundances and Atomic Weights of the International Union of Pure and Applied Chemistry) от 2019 г.

Результаты исследования и их обсуждение

Описание кубоида химических элементов, минералов и горных пород. Рассматри-

ваемый кубоид характеризуется вертикальными группами по шесть химических элементов и горизонтальными периодами по четыре элемента. Отличие этих пространственных групп и периодов от таковых в периодической таблице химических элементов подчеркивается их наименованием как пространственных образований. Все группы предлагается называть по их порядковому номеру, а также по первому и последнему химическим элементам. Ассоциации групп привязываются к граням куба и плоскостям, которые им параллельны. Грани характеризуются четырьмя химическими элементами в вершинах кубоида с их перечислением в порядке возрастания атомных весов.

Рассмотрим грани модели: H-Li-Mg-P (1), H-Li-Bi-Hg (2), Li-Mg-U-Bi (3), H-P-Am-Hg (4), P-Mg-U-Am (5), Hg-Bi-U-Am (6). В скобках указаны их номера. Нумерация проведена по возрастанию сумм атомных весов химических элементов, ассоциированных с ними. Водород, находящийся во 2-й пространственной группе, при наименовании граней использован вместо вакансии 1-й пространственной группы.

Для обоснования порядка нумерации граней были сделаны расчеты нескольких пока-



зателей как на основе атомных весов стабильных химических элементов, граней кубоида, так и в их совокупности с атомными весами радиоактивных элементов (табл. 1). Значения показателя 6 многомерной пропорциональности определялись на основе минимального и максимального атомных весов химических элементов грани. Значения показателя 7 рассчитаны по атомным весам всех химических элементов грани. Расчеты выполнялись в программе Agemarket с открытым кодом [6].

Для сочетаний по два атомных веса при расчете показателя 6 определялось точное теоретическое значение показателя многомерной пропорциональности с использованием расчетов по формуле биномиального распределения, результаты показаны в графе 7 табл. 1. При расчете показателя 7 для первой, второй и четвертой граней с вакансией бралось по 15 атомных весов и по 16 атомных весов для каждой из остальных граней кубоида. По этим исходным данным сделана оценка показателя многомерной пропорциональности на основе расчета 2 млн информационных коэффициентов пропорциональности для атомных масс каждой грани.

Значения всех показателей первой и шестой граней намного отличаются от таковых для остальных граней. По тенденции изменения наиболее информативны значения показателей в графах 6–8, от второй до шестой грани они возрастают (графа 6) или убывают (графы 7–8). Единственный показатель, зна-

чения которого имеют однозначную тенденцию (возрастания) от первой до шестой грани – это сумма атомных весов всех химических элементов грани (графа 6). Этот показатель принимаем как ее наиболее информативную характеристику.

Отметим, что кубоид характеризуется неопределенностью суммы атомных весов для всех его граней из-за области вакансии и некоторой неопределенности атомных весов радиоактивных химических элементов, ассоциированных с этими гранями. Вторая грань, которая не содержит радиоактивных химических элементов, имеет другую причину неопределенности – область вакансии.

Для характеристики кубоида в первую очередь предлагается использовать его четные грани. Вторая грань определяется группами 1-2-3-4 с максимальным размахом атомных весов стабильных химических элементов. Эти группы считаем также группами первой матрицы, а группы 5-6-7-8, 9-10-11-12 и 13-14-15-16, соответственно, группами второй, третьей и четвертой матрицы этой грани. Группы четвертой матрицы формируют уже другую грань, их в общем случае считаем группами первой матрицы пятой грани, а группы 9-10-11-12 в таком же случае характеризуем как группы второй матрицы этой же грани.

Первую матрицу четвертой грани составляют элементы групп 1-8-9-16 с максимальным размахом варьирования атомных весов всех химических элементов кубоида. Остальные группы можно рассматривать как матрицы,

Таблица 1. Значения альтернативных показателей граней кубоида
Table 1. Values of alternative indexes of cuboid faces

Номер грани	Размах варьирования атомных весов стабильных химических элементов	Размах варьирования атомных весов всех химических элементов	Сумма атомных весов «вершинных» химических элементов	Сумма атомных весов стабильных химических элементов	Сумма атомных весов всех химических элементов грани	Показатель 6	Показатель 7*
1	2	3	4	5	6	7	8
1	30	30	63	246	246	0,4998	0,3911
2	208	208	418	2397	2397	0,5295	0,4204
3	202	231	478	2075	2753	0,5029	0,4073
4	187	242	476	2069	2761	0,4792	0,3948
5	173	219	536	2152	3114	0,4516	0,3891
6	8	42	891	821	3564	0,3333	0,3325

Примечание. * Для первой грани при учете дополнительного атомного веса водорода вместо вакансии этот показатель равен 0,4083.



которые параллельны этой грани: 2-7-10-15, 3-6-11-14. Это, соответственно, вторая и третья матрицы четвертой грани, при этом группы 3-6-11-14 предпочтительнее определять как группы второй матрицы третьей грани.

Таким образом, вторая и четвертая грани дают возможность полной характеристики положения в кубоиде вертикальных пространственных групп, а также их ассоциаций во взаимно перпендикулярных плоскостях. В связи с первой гранью можно рассматривать химические элементы в коротких непрерывных и дискретных пространственных горизонтальных периодах. Непрерывность или дискретность определяются различием в изменчивости атомных весов химических элементов в таких периодах.

В пределах этой грани «параллельно» и «перпендикулярно» второй грани располагаются химические элементы, объединенные, соответственно, в шестнадцать непрерывных и шестнадцать дискретных коротких периодов по четыре химических элемента в каждом. Первый непрерывный период – 0-H-He-Li, второй – Be-B-C-N, ..., пятый – S-Cl-Ar-K, ..., двадцать четвертый – U-Np-Pu-Am, первый дискретный период – 0-N-O-P, второй – H-C-F-Si, ..., пятый – S-V-Cr-Ga, ..., двадцать четвертый – Bi-Po-Pa-U.

По аналогии с матрицами второй и четвертой граней можно охарактеризовать короткие периоды в связи с шестью матрицами первой грани. Кроме граней рассмотрим и ребра кубоида, их предлагается называть как по первому и последнему химическим элементам, так и по всем четырем химическим элементам, связанным с рассматриваемым ребром, например ребро Hg-Bi (Hg-Tl-Pb-Bi). Короткие периоды обозначаем начиная с химических элементов с наименьшими атомными весами. Вместо вакансий в названиях граней и ребер указываем водород.

В некоторых случаях рациональны альтернативные термины для характеристики граней модели. Первую грань считаем верхней (top face), вторую – левой (left face), третью – фронтальной (front face), четвертую – дорсальной (dorsal face), пятую – правой (right face), шестую – нижней (lower face). Как указывалось ранее, с каждой гранью обычно счи-

таем ассоциированными две матрицы, но допустимо ассоциировать и все четыре матрицы, например для характеристики изменчивости свойств атомов и химических соединений в направлении, перпендикулярном этой грани.

В общем случае также упоминаем по три матрицы верхней и нижней граней, а в частном случае все шесть матриц ассоциируем с верхней или нижней гранями. Верхняя и нижняя грани составляют пару горизонтальных граней, фронтальная и дорсальная грани являются фронтальными, а левую и правую грани считаем боковыми.

Введем понятия, характеризующие смежные элементарные и составные объемы кубоида. Каждый химический элемент сопоставляется с соответствующим элементарным объемом. Среди составных объемов различим дискретные и непрерывные, характеризуем их ассоциированными с ними химическими элементами, избегая неопределенности. Например, непрерывный объем 0-Ge 1-й группы, который включает элементарные объемы вакансии, серы и германия. Непрерывный объем предлагается упоминать просто как объем. Будем также различать межгрупповые, в том числе и диагональные объемы, например объем серы и титана S-Ti.

Можно также упомянуть дискретный объем 0-Ge, который включает объемы вакансии и германия, при этом не возникает неопределенности его состава. Если же мы укажем на дискретный объем 0-Cd, то неопределенность состава этого объема проявляется, так как речь может идти как об элементарных объемах вакансии, германия и кадмия, так и об объемах вакансии, серы и кадмия, а также объемах вакансии и кадмия. С геологической точки зрения интересны некоторые дискретные объемы, так что можно будет перейти от изучения дискретного объема Ag-Au к рассмотрению (непрерывного) объема того же наименования.

Определим также операции объединения и пересечения дискретных и непрерывных объемов в соответствии с одноименными операциями со множествами. Например, объединение дискретных объемов 0-Ge и Cd-Hg дает четыре элементарных объема 0, Ge, Cd, Hg,



в то время как объединение объемов O-Ge и Cd-Hg дает нам все объемы 1-й пространственной группы. Пересечения указанных пар дискретных и непрерывных объемов не содержат химических элементов.

Элементарные объемы кубоида могут быть смежными по грани, ребру или по точке. Так, объемы серы и ванадия, серы и хлора являются смежными. Для первой пары объемов это смежность по боковым, а для второй пары – по фронтальным граням. Следует также определить диагональную смежность по ребру: это, например, случай взаимного расположения серы и титана.

Другой тип смежности будем различать при разных позициях химических элементов в смежных пространственных группах относительно вертикальных граней: это, например, случай объемов серы и иттрия, а также серы и мышьяка. Рассмотрим позиции этих элементов относительно верхней грани. Сера располагается выше упомянутых химических элементов, смежных с ней по ребру, считаем ее во второй позиции (выше), в то время как итрий и мышьяк занимают третью позицию (ниже). Позиции рационально указывать и в случае диагональной смежности по точке, например, в случае серы и стронция сера располагается во второй позиции, а стронций – в третьей. Возможные типы смежности химических элементов показаны на примере первых двух объемов 1-й пространственной группы (табл. 2) и объемов, смежных с ними.

Системные свойства кубоида в свете свойств химических элементов. Важную роль в образовании соединений химических элементов играют их свойства, такие как валентность (способность атома образовывать химические связи с другими атомами) и электроотрицательность или степень окисления

(свойство атомов элементов оттягивать на себя электроны от других атомов в соединении). Поэтому перспективно рассмотрение валентностей и электроотрицательности химических элементов в приложении к частям кубоида, в первую очередь к пространственным группам.

Установлено, что в пространственных группах элементы имеют, как правило, равные валентности. Чередуются группы химических элементов со значениями валентности II и III. Так, в нечетных группах (1, 3, 5, 7, 9, 11, 13, 15) у химических элементов имеется валентность II, в четных группах (2, 4, 6, 8, 10, 12, 14, 16) – валентность III. Исключения в отмеченной закономерности наблюдаются для 24 химических элементов из 95: Gd, H, He, Ar, Dy, Li, K, Cs, Fr, Sr, Xe, Rn, Rb, Kr, Er, Na, Tc, Pa, Ne, Ce, Th, F, Hf, Nd.

В нечетных, диагонально расположенных группах 1-7-11-13, 9-15, 3-5, а также 3-7-9, 5-11-15 химические элементы имеют одинаковые значения валентности, равные II, а в четных группах 4-6-10-16, 2-8, 12-14, а также 8-10-14 и 2-6-12 – одинаковые значения валентности, равные III. При этом в пределах пятой грани (P-Mg-U-Am), включающей группы 16, 15, 14, 13, отклонения от установленной закономерности практически не отмечаются.

Данное обстоятельство объясняется прежде всего тем, что в данных группах отсутствуют инертные газы с валентностью, равной 0, а также элементы, которые по своему строению электронных оболочек не могут иметь валентность более I. Единственное отклонение от установленной закономерности отмечается в группе 13: это химический элемент Nd, относящийся к лантаноидам, который не имеет валентности II, присущей всем элементам этой группы.

Таблица 2. Типы смежности объемов химических элементов в кубоиде
Table 2. Types of chemical element volume adjacency in the cuboid

Смежность по грани				Смежность по ребру				Смежность по точке	
Фронтальные грани		Боковые грани		Фронтальные грани		Боковые грани		Первая позиция	Вторая позиция
				Первая позиция	Вторая позиция	Первая позиция	Вторая позиция		
O	H	O	N	O	Cl	O	V	O	Ti
S	Cl	S	V	S	As	S	Y	S	Sr
				H	S	N	S	C	S



Отметим, что из двадцати четырех химических элементов, относящихся к разряду исключений, пять химических элементов: H, K, F, Na и Li – по своему строению электронных оболочек не могут иметь валентность более I; другие шесть химических элементов: He, Ne, Ar, Xe, Rn, Kr – имеют валентность, равную 0 (инертные). Особые обоснования отклонений применимы к тринадцати химическим элементам: Gd, Dy, Pa, Tc, Pr, Hf, Cs, Fr, Sr, Rn, Rb, Er, Nd. Из них основное количество – одиннадцать химических элементов – имеют только одну постоянную валентность: Cs (I), Fr (I), Rb (I), Sr (II), Gd (III), Dy (III), Pr (III), Er (III), Th (IV), Hf (IV), Tc (VI).

Только два химических элемента: Ce и Nd – имеют переменные значения валентности, отличающиеся от значений по группам 11 и 13 соответственно. Рассмотрим отдельно характеристики последних. Ce и Nd имеют переменную валентность III и IV (в группах, для которых установлена валентность, равная II). Церий и неодим относятся к лантаноидам, по химическим свойствам весьма сходны между собой, что объясняется строением электронных оболочек их атомов: по мере увеличения заряда ядра структура двух внешних электронных оболочек не меняется, так как происходит заполнение электронами третьей снаружи оболочки – глуболежащего 4f-уровня. Максимально возможное число электронов на f-уровне равно 14, что определяет число элементов семейства лантаноидов. Эти элементы входят в одну подгруппу: цериевую, включающую церий Ce, празеодим Pr, неодим Nd, прометий Pm, самарий Sm, европий Eu.

Закономерную изменчивость валентности химических элементов, объединенных в пространственные группы, предлагается рассматривать как одно из системных свойств рассматриваемого кубоида. Исключения есть, но они есть и в классически охарактеризованных закономерностях периодической таблицы химических элементов [9]. Еще одним направлением исследования валентности может быть анализ «странных» валентностей химических элементов в минералах [10] и учет ограничений на использование понятия «валентность» как интегральной характеристики способности элемента присоединять определенное число

других элементов при образовании любой разновидности химической связи [11].

Для выявления других системных свойств кубоида были использованы как сами показатели электроотрицательности химических элементов, так и расчеты показателей многомерной пропорциональности электроотрицательностей (ПМПЭ) (*англ.*: index of multidimensional proportionality of electronegativity) и многомерной пропорциональности атомных весов химических элементов (ПМПВ) (*англ.*: index of multidimensional proportionality of atomic weights) в пространственных группах. В дальнейшем выделялись и анализировались ассоциации групп, близких по этим трем различным показателям.

Изменчивость электроотрицательности химических элементов eV по шкале Малликена в пространственных группах изучалась нами при помощи построения и сравнения гистограмм показателей электроотрицательности для смежных пространственных групп.

Наибольшее сходство в тенденциях изменения электроотрицательности химических элементов в одних и тех же пространственных позициях отмечено в смежных пространственных группах 4 и 5, 12 и 13, 13 и 14. Это три из пяти смежных в пространственных группах пар, у которых в первой позиции располагается твердый химический элемент. По одному различию отмечено в пространственных группах 3 и 6, 11 и 14, 14 и 15, 15 и 16. Последнее две пары также имеют в первой позиции твердый химический элемент. В остальных парах групп такой закономерности не наблюдалось.

Тем не менее полученные данные позволяют уверенно отличить по изменению показателей электроотрицательности пространственные группы третьей и пятой граней объемной модели и смежные с ними пространственные группы 3, 6 и 11 от остальной части модели. За исключением пространственных групп 3 и 11 все перечисленные группы имеют твердый химический элемент в первой позиции. В дополнение к этому отметим, что в перечисление не попадает только 3-я пространственная группа из числа групп с твердым химическим элементом в первой позиции.

Дополнительная информация была получена после расчетов показателей многомер-



ной пропорциональности. При этом имитировался «рост» модели от первой грани к шестой, что в пространственных группах соответствует последовательному добавлению химических элементов от первой до шестой позиций. Соответственно такому «росту» были рассчитаны ПМПЭ и ПМПВ для химических элементов всех пространственных групп. Другими словами, указанные показатели вычислялись для двух химических элементов в первой и второй позициях каждой группы, а затем для следующих расчетов последовательно добавлялись показатели электроотрицательности или атомные веса химических элементов в третьей, четвертой, пятой и шестой позициях каждой расчетной группы.

Если показатели электроотрицательности для химических элементов eV по шкале Малликена (табл. 3) в шестой позиции не определены, например, для актиния в 10-й пространственной группе, то расчеты для пяти и шести элементов группы показаны как равные по величине.

Оценивалось сходство в изменении электроотрицательностей химических элементов разных пространственных групп в одних и тех же пространственных позициях путем попарного сравнения соответствующих диаграмм. Наибольшее сходство отмечено в пространственных группах 4 и 5, 12 и 13, 13 и 14. Все эти пары составляют группы, которые смежны в модельном пространстве. Кроме этого, смеж-

ны в указанном пространстве первые две из перечисленных пар, а последние две пары имеют общую 13-ю группу. Это можно интерпретировать как взаимное «влияние» смежных пространственных групп и даже пар групп. Возникает вопрос о природе этого влияния, и ответа на него еще нет.

По одному различию отмечено в пространственных группах 3 и 6, 11 и 14, 14 и 15, 15 и 16. В модельном пространстве это хорошо сопоставляется с тем, что отмечалось для пространственных групп 4 и 5, 12 и 13, 13 и 14, только отмечается больше пар с общей группой. В остальных парах групп закономерной изменчивости электроотрицательности не наблюдалось.

Полученные данные позволяют «отделить» пространственные группы третьей и пятой граней объемной модели и смежные с ними пространственные группы 3, 6 и 11 от остальной части модели. Такое разделение групп близко к соотношению $2/3$ и $1/3$, и оно, предположительно, важно.

Дополнительная информация о модели была получена при анализе результатов ПМПЭ и ПМПВ. Для 1-й пространственной группы невозможен расчет ПМПЭ и ПМПВ для двух первых химических элементов из-за области вакансии. При расчетах с атомными весами для радиоактивных химических элементов брались приближительные атомные веса, для определения результирующего показателя I_{av}

Таблица 3. Электроотрицательность химических элементов в пространственных группах по шкале Малликена eV

Table 3. Electronegativity of chemical elements in space groups on the Mulliken scale (eV)

Электроотрицательность химических элементов в пространственных группах 1–8															
1	eV	2	eV	3	eV	4	eV	5	eV	6	eV	7	eV	8	eV
0	–	H	7,18	He	12,29	Li	3	Be	4,41	B	4,29	C	6,26	N	7,23
S	6,22	Cl	8,29	Ar	7,88	K	2,42	Ca	3,07	Sc	3,37	Ti	3,45	V	3,64
Ge	4,57	As	5,31	Se	5,89	Br	7,59	Kr	7	Rb	2,33	Sr	2,87	Y	3,26
Cd	4,14	In	3,09	Sn	4,23	Sb	4,85	Te	5,49	I	6,76	Xe	6,07	Cs	2,18
Gd	3,14	Tb	3,51	Dy	3,15	Ho	3,18	Er	3,21	Tm	3,61	Yb	3,12	Lu	2,89
Hg	4,97	Tl	3,24	Pb	3,89	Bi	4,11	Po	4,91	At	5,87	Rn	5,37	Fr	2,21
Электроотрицательность химических элементов в пространственных группах 9–16															
9	eV	10	eV	11	eV	12	eV	13	eV	14	eV	15	eV	16	eV
O	7,54	F	10,41	Ne	10,78	Na	2,84	Mg	3,62	Al	3,21	Si	4,77	P	5,62
Cr	3,72	Mn	3,46	Fe	4,03	Co	4,27	Ni	4,4	Cu	4,48	Zn	4,4	Ga	3,21
Zr	3,53	Nb	3,84	Mo	3,92	Tc	3,91	Ru	4,2	Rh	4,3	Pd	4,45	Ag	4,44
Ba	2,68	La	3,06	Ce	3,05	Pr	3,21	Nd	3,72	Pm	2,86	Sm	2,9	Eu	2,89
Hf	3,5	Ta	4,1	W	4,4	Re	3,97	Os	4,89	Ir	5,34	Pt	5,57	Au	5,77
Ra	2,69	Ac	–	Th	3,63	Pa	–	U	3,36	Np	–	Pu	–	Am	–



ПМПВ было выполнено всего по 60 млн расчетов информационных коэффициентов пропорциональности.

Все ПМПЭ групп были сортированы по возрастанию для каждого варианта расчета (табл. 4), и последовательность групп, начинающихся с твердого химического элемента, обособилась от последовательности групп с газом в первой позиции. Такие пространственные группы предлагается называть группами S (*от англ.: solid*) и G (*от англ.: gas*).

В случае, если все пространственные группы смежны и образуют непрерывную последовательность, то можно говорить о (пространственно) последовательных ассоциациях групп, например, пространственные группы 12 и 13 образуют последовательную ассоциацию в отличие от групп 12, 13 и 15. Если ассоциации групп содержат только группы S или G, то рассматриваются однородные (*англ.: homogeneous*) ассоциации HS или HG, или просто ассоциации, а если группы S или G в ассоциациях представлены в преобладающем числе, то такие ассоциации предлагается называть соответственно доминантными (*англ.: dominant*) ассоциациями S- или G-типов (DS или DG).

Обособление двух ассоциаций S- и G-групп,

отраженное в табл. 3, носит доминантный характер, значение ПМПЭ 1-й пространственной группы во всех вариантах расчетов определяет ее принадлежность к DS-ассоциации, что является признаком принадлежности этой группы к S-типу. Если принять это и провести границу двух ассоциаций DS и DG после первых десяти групп, то получаем четырнадцать anomalно расположенных пространственных групп для всех вариантов расчетов табл. 3. Не на «своих» системных местах располагается по семь S- и G-групп, чаще всего это 4-я и 2-я группы.

Если провести указанную выше границу после первых девяти групп, получаем тринадцать anomalно расположенных пространственных групп для всех вариантов расчетов, среди них девять S- и четыре G-групп, чаще всего это те же 4-я и 2-я группы. Таки образом, лучший вариант разбивки предполагает границу после первых девяти по возрастанию показателей ПМПЭ. Это подтверждается и тем, что при таком разграничении абсолютно лучший вариант с одним anomalным значением для 4-й группы мы получаем для показателей ПМПЭ всех шести химических элементов групп (последняя графа табл. 3).

Таблица 4. Сортированные значения показателей многомерной пропорциональности электроотрицательностей для двух, трех, четырех, пяти и шести химических элементов в каждой пространственной группе

Table 4. Sorted values of electronegativity multidimensional proportionality indexes for two, three, four, five, and six chemical elements in each space group

Группа	ПМПЭ 2*	Группа	ПМПЭ 3	Группа	ПМПЭ 4	Группа	ПМПЭ 5	Группа	ПМПЭ 6
1	–	15	0,3321	13	0,3329	13	0,3338	13	0,3344
15	0,3321	13	0,3329	12	0,3359	12	0,3354	12	0,3354
2	0,3327	14	0,3352	1	0,3367	15	0,3387	15	0,3387
13	0,3333	1	0,3356	14	0,3374	14	0,3398	1	0,3395
4	0,3337	12	0,3365	15	0,3375	1	0,341	14	0,3398
6	0,3341	2	0,3371	16	0,3426	16	0,3439	16	0,3439
14	0,3362	16	0,3399	5	0,3454	5	0,3469	5	0,3445
5	0,337	6	0,3413	7	0,3492	7	0,3492	7	0,3474
12	0,3383	3	0,3459	2	0,3516	6	0,3501	6	0,3503
3	0,3395	5	0,349	6	0,3539	9	0,351	9	0,3511
16	0,3438	7	0,3491	3	0,3546	2	0,3535	4	0,3531
7	0,3453	9	0,3507	9	0,3546	8	0,3564	2	0,3547
8	0,3494	8	0,3513	8	0,3596	4	0,3571	8	0,3572
9	0,3504	4	0,362	4	0,3605	11	0,3614	11	0,3586
11	0,3657	11	0,3654	11	0,3676	10	0,3622	10	0,3622
10	0,373	10	0,3688	10	0,3684	3	0,3639	3	0,3634

Примечание. * ПМПЭ – показатель многомерной пропорциональности электроотрицательностей; цифра показывает число химических элементов в расчете, начиная с первой позиции в группе, показатели электроотрицательности которых взяты для расчета. Курсивом показаны первая пространственная группа с вакансией и пространственные группы S.



Тем не менее при такой разбивке мы фактически принимаем, что 1-ю пространственную группу лучше не числить среди S-групп, даем разбивку всех шестнадцати совокупностей на девять S- и шесть G-групп, а 1-ю группу рассматриваем отдельно от всех других. В целом отметим, что близкие варианты разбивки на S- и G-ассоциации обуславливают некоторую неопределенность разделения на две совокупности групп.

Учитывая некоторую аномальность групп 2 и 4 по показателям ПМПЭ, проанализируем поведение водорода и лития, которые располагаются в их первых позициях. Водород имеет тенденцию формировать ковалентные связи с большинством неметаллов, большая часть водорода на Земле существует в молекулярных соединениях, таких как вода или органические вещества, в том числе углеводороды нефтяного ряда. Возможно, так проявляется системная тенденция специфического «сродства» водорода к твердым химическим элементам через переход его химических соединений в промежуточное от газообразного к твердому жидкое состояние. Практически весь водород на Земле находится в виде соединений, и лишь в очень незначительном количестве он содержится в атмосфере.

Литий имеет наименьшую плотность среди твердых химических элементов. Достаточно распространенный в природе LiCl встречается преимущественно в растворах, а кристаллический LiCl еще не зарегистрирован в IMA как минерал. При этом растворимость LiCl, возможно, отражает свойство лития в составе химических соединений переходить в жидкое («промежуточное» относительно газообразного) состояние в соответствии с системным свойством группы 4, в которой на первой позиции должен быть газ.

При уменьшении числа элементов в пространственных группах при расчетах ПМПЭ происходит небольшое увеличение числа аномальных групп (групп S среди преобладающих G и наоборот) и оно остается небольшим вплоть до минимально проанализированных двух показателей электроотрицательности. Это можно интерпретировать так, что уже два химических элемента в первых позициях, а возможно, и один элемент в первой позиции обладают системными свойствами всей пространственной группы.

По схеме с последовательным уменьшением числа химических элементов, отраженной в табл. 4, были сделаны расчеты ПМПВ. В табл. 5 цифрой ПМПВ, например ПМПВ 2,

Таблица 5. Сортированные значения показателей многомерной пропорциональности атомных весов двух, трех, четырех, пяти и шести химических элементов в каждой пространственной группе
Table 5. Sorted values of multidimensional proportionality indexes of atomic weights
of two, three, four, five and six chemical elements in each space group

Группа	ПМПВ 2*	Группа	ПМПВ 3	Группа	ПМПВ 4	Группа	ПМПВ 5	Группа	ПМПВ 6
1	–	1	0,3561	1	0,3672	1	0,375	1	0,38
16	0,3558	16	0,3669	16	0,375	16	0,3807	16	0,3848
15	0,3576	15	0,371	15	0,3792	15	0,3845	15	0,3886
14	0,3583	14	0,3713	14	0,3792	14	0,3852	14	0,3892
13	0,3597	13	0,3756	13	0,3842	13	0,3897	13	0,3935
12	0,3631	12	0,3767	12	0,3849	12	0,3902	12	0,3936
11	0,3677	11	0,3823	11	0,3903	11	0,3948	11	0,3979
10	0,3705	10	0,3837	10	0,3921	10	0,3963	10	0,399
9	0,37	9	0,3914	9	0,3988	9	0,4018	9	0,4038
8	0,3854	8	0,3969	8	0,4024	8	0,4047	8	0,4064
7	0,3916	7	0,4038	7	0,4083	7	0,4096	7	0,4106
6	0,3945	6	0,4078	6	0,4113	6	0,4123	6	0,4121
5	0,399	5	0,4159	5	0,4197	5	0,4191	5	0,4179
4	0,4152	4	0,4253	4	0,4257	4	0,4243	4	0,4227
3	0,4515	3	0,4458	3	0,438	3	0,4327	3	0,429
2	0,5036	2	0,4771	2	0,4593	2	0,4485	2	0,4414

Примечание. * ПМПВ – показатель многомерной пропорциональности атомных весов химических элементов; цифра показывает число химических элементов в расчете, начиная с первой позиции в группе, атомные веса которых взяты для расчета. Курсивом показаны первая пространственная группа с вакансией и пространственные группы S.



показано число химических элементов, начиная с первой позиции в группе, атомные веса которых взяты в расчет. После их сортировки по возрастанию выявилось чередование последовательностей пространственных HS- и HG-групп (см. табл. 5).

Химические элементы 1-й группы по ПМПВ также оказались близки к элементам пространственных групп S, как это уже отмечалось по результатам анализа ПМПЭ.

Для подтверждения полученных данных и получения дополнительной информации были также рассчитаны дисперсии ПМПЭ для восьми (без первой группы) и отдельно семи пространственных групп по возрастанию значения ПМПЭ (см. табл. 4). По характеру изменения этих дисперсий отчетливо различаются s-распределения дисперсий, характерные для S-групп, и g-распределения дисперсий, свойственные G-группам (табл. 6). Для s-распределений при увеличении числа химических элементов с двух до трех (до четырех элементов для групп 2, 4–6, 12–15) характерен рост дисперсий, а при дальнейшем увеличении числа элементов наблюдается постепенное

уменьшение дисперсий. Уменьшение дисперсий ПМПЭ, характеризующих g-распределения, отмечается уже при расчетах с показателями электроотрицательности двух химических элементов.

Были также рассчитаны дисперсии ПМПВ последовательностей пространственных групп двух типов и одной ассоциации (табл. 7). Как и в случае рассмотрения дисперсий ПМПЭ, отчетливо проявлено различие распределений дисперсий s- и g-типов.

По изменению дисперсий ПМПВ можно предположить, что на последовательность HS7-4 как-то воздействуют G-ассоциации, а на последовательность HG2-3 воздействуют ассоциации S-групп. И несмотря на то что для последовательностей HS12-16 и HG8-11 подобного «воздействия» не отмечается, выявленные эффекты в связи с атомными весами химических элементов позволяют говорить о том, что кубоид обладает выраженными системными свойствами и такая модель может быть свойственна всей материи, а не только образованиям земной коры.

Таблица 6. Дисперсии показателей многомерной пропорциональности электроотрицательностей ассоциаций и последовательностей пространственных групп при возрастании числа химических элементов в группах от двух до шести

Table 6. Index variances of electronegativity multidimensional proportionality of association and sequence of space groups with increasing number of chemical elements in groups from two to six

Тип	Группы	2* элемента	Группы	3 элемента	Группы	4 элемента	Группы	5 элементов	Группы	6 элементов
HS-s	4–7, 12–16	1,93E-05	4–7, 12–16	8,46E-05	4–7, 12–16	7,51E-05	4–7, 12–16	5,1E-05	4–7, 12–16	3,76E-05
DS-s	2, 4–6, 12–15	4,3E-06	2, 3, 6, 12–16	1,84E-05	2, 5, 7, 12–16	3,95E-05	5–7, 12–16	3,39E-05	5–7, 12–16	2,81E-05
DG-g	3, 7–11, 16	1,29E-04	4, 5, 7–11	6,18E-05	3, 4, 6, 8–11	3,2E-05	2–4, 8–11	1,95E-05	2–4, 8–11	1,8E-05
HG-g	2, 3, 8–11	1,94E-04	2, 3, 8–11	1,19E-04	2, 3, 8–11	4,25E-05	2, 3, 8–11	2,26E-05	2, 3, 8–11	1,77E-05

Примечание. * Число химических элементов, начиная с первой позиции в группе, дисперсии показателей многомерной пропорциональности которых взяты для расчета.

Таблица 7. Дисперсии показателей многомерной пропорциональности атомных весов химических элементов для последовательностей пространственных групп и ассоциации 1–12

Table 7. Index variances of multidimensional proportionality of chemical element atomic weights for spatial group sequences and 1–12 association

Последовательность групп	Тип	Число химических элементов				
		2	3	4	5	6
16-12	HS-s	6,06E-06	1,25E-05	1,32E-05	1,24E-05	1,09E-05
1-12	DS-s	6,06E-06	4,68E-05	3,54E-05	2,73E-05	2,28E-05
7-4	HS-g	8,38E-05	6,78E-05	4,69E-05	3,33E-05	2,3E-05
11-8	HG-g	4,73E-05	3,52E-05	2,41E-05	1,62E-05	1,2E-05
3-2	HG-s	6,79E-04	2,63E-03	1,55E-03	9,98E-04	7,02E-04



Перспективно дальнейшее изучение взаимодействия пространственных групп. Назовем это проблемой взаимодействия групп. Для решения данной проблемы рационально будет рассмотреть взаимоотношения химических элементов первой и второй позиций рассматриваемых групп в аспектах их физических и химических свойств.

Позиционирование минералов в объемной модели. Отмеченные нами закономерности свойств атомов химических элементов в пространственных группах свидетельствуют о том, что объемная модель в должной мере подтверждается свойствами химических элементов. После получения данных о достоверности объемной модели химических элементов были сделаны расчеты для позиционирования минералов в первых восьми пакетах. С сайта IMA¹ была скопирована таблица минералов в формате Excel. Все минералы были разбиты на группы по очередности расчетов.

Первоочередной для расчетов была принята примерно треть из 5704 минералов по условию минимальности разности атомных весов химических элементов в составе минералов с учетом как абсолютной, так и относительной разности. Так, для химических элементов второй половины периодической таблицы химических элементов для получения небольших по величине значений показателя I_{av} допускалась большая абсолютная разница по сравнению с элементами первой половины этой таблицы.

Поскольку минералы имеют переменный состав, их химические формулы могут отличаться от идеальных. Одни минералы, например кварц, характеризуются относительно постоянным составом, другие имеют переменный состав, не подчиняющийся постоянным и кратным отношениям. В последнем случае рационально различать минералы, у которых в современных базах данных химическая формула совпадает с эмпирической. Например, у берилла $\text{Be}_3\text{Al}_2\text{Si}_6\text{O}_{18}$ структурную позицию атомов алюминия в составе природного образца могут занимать атомы хлора, а вме-

сто двух атомов алюминия (Al_2) может фиксироваться состояние $\text{Al}_{1,85}\text{Cr}_{0,15}$, но в базе данных IMA приводится только химическая формула. Этой формулой ограничивается и представление берилла в минералогической базе данных Webmineral², а также в онлайн-сборнике Handbook of Mineralogy³, размещенном Минералогическим обществом Америки.

Указанные базы данных ассоциированы с базой данных IMA, в том числе и в отношении формул минералов. Например, в состав сфалерита обычно входит железо. База данных IMA содержит только химическую формулу сфалерита ZnS , в то время как база Webmineral в качестве химической формулы приводит $(\text{Zn,Fe})\text{S}$ и дополняет характеристику указанного минерала эмпирической формулой $\text{Zn}_{0,95}\text{Fe}_{0,05}\text{S}$. Рассмотрим также состав теларгпалита, который IMA и Webmineral характеризуют химической формулой $(\text{Pd,Ag})_3\text{Te}$, а Webmineral в дополнение уточняет этот химический состав эмпирической формулой $\text{Pd}_{2,8}\text{Ag}_{0,2}\text{Te}$.

В случае, если IMA для минерала приводит формулу постоянного состава, для расчетов в программе с открытым кодом Agemarket брались атомные веса пропорционально этому составу: например, для сфалерита принимались в расчет по 2,1 млрд атомных весов цинка и серы. Если же IMA показывает переменную формулу минерала, в расчет брались данные эмпирической формулы: для теларгпалита, например, расчеты проводились с атомными весами палладия 2,94 млрд, атомными весами серебра 0,21 млрд и атомными весами теллура 1,05 млрд.

Эмпирические формулы брались из базы данных Webmineral, а в случае их отсутствия использовались также данные минералогической базы Mindat⁴ или сборника Handbook of Mineralogy. В отдельных случаях (при отсутствии эмпирических формул) соотношения атомных весов брались по химическому составу природных образцов минералов. Особо обратим внимание на минерал дельталюмит. Этот минерал с вакансией предположительно

¹ International Mineralogical Association [Электронный ресурс]. URL: <https://mineralogy-ima.org/> (10.11.2022).

² Webmineral [Электронный ресурс]. URL: <https://webmineral.com/> (10.11.2022).

³ Handbook of Mineralogy [Электронный ресурс]. URL: <https://handbookofmineralogy.org/> (10.11.2022).

⁴ Mindat [Электронный ресурс]. URL: <https://www.mindat.org/> (10.11.2022).



не диморфен корунду, место для него в порядке возрастания ПМПВ определено условно и подлежит дальнейшему уточнению.

Атомные веса для всех расчетов приняты, как указывалось выше, по данным Комиссии по содержанию изотопов и атомным весам Международного союза теоретической и прикладной химии от 2019 г. Вначале в программе Agemarker делались расчеты 60 млн информационных коэффициентов пропорциональности I_p в одном расчетном потоке, так как иначе генератор случайных чисел выдает одно случайное число для инициации двух и более расчетов по количеству расчетных потоков. Это уменьшает объем независимых I_p , на основе которых и определялось I_{av} как среднее арифметическое массива I_p . Повторно одним потоком выполнялись итоговые расчеты 4,2 млрд I_p . Результаты каждого такого расчета для контроля сравнивались с предварительными, при необходимости анализировались причины расхождений.

Результаты расчетов представлены в табл. 8–15. Предварительный анализ указывает на правильность позиционирования минералов, но в отдельных случаях могут быть перестановки минералов, как правило, не более чем на 1–2 позиции. В исключительных случаях для минералов переменного состава может понадобиться их перестановка на 10–15 позиций, например, такое возможно для минерала дельталюмита в третьем пакете. Ранее уже была предпринята попытка позиционирования минералов первого пакета [4, 6], но не были учтены некоторые минералы, в том числе и открытые после 2012 года.

Миграция химических элементов в объемной модели. Позиция минерала в объемной модели одновременно является и позицией его «материнского» химического элемента. В общем случае ни один из химических элементов минерала не совпадает с позицией «материнского» химического элемента и должен произойти его привнос по определенному миграционному пути. Иначе, в частном случае, возможно указанное совпадение и можно говорить о первичном концентрировании химического элемента минерала.

Другими словами, совместное нахождение химических элементов в составе минералов

при их позиционировании в кубоиде должно предваряться миграцией химических элементов в определенную объемную позицию. При этом предполагается самовоспроизводство (трансляция) кубической модели [4] в горизонтальном и вертикальном направлениях. В таком представлении геологическое пространство заполнено периодически повторяющимися модельными кубоидами, которые являются единой миграционной средой.

Для примера рассмотрим сильвин KCl. Этот минерал, являясь двадцать четвертым минералом первого пакета, занимает в кубоиде позицию хрома 9Cr2, где 9 – номер пространственной группы, а 2 – позиция хрома в группе. При этом расположение как калия, так и хлора не совпадает с «материнским» хромом и они, следовательно, должны быть привнесены и вторично концентрированы в позиции этого минерала. Необходимо определить путь, по которому эти химические элементы могли попасть в область объемной позиции хрома, без рассмотрения движущих сил такой миграции.

Для характеристики миграции химических элементов минералов в объемную позицию их «материнских» химических элементов предположим, что:

- миграция из одного кубоида в другой проходит подобно миграции внутри кубоида;
- миграция имеет периодический характер со сменой направления миграции;
- миграционные потоки следуют кратчайшим расстоянием между двумя объемными позициями;
- в горизонтальном направлении элементы мигрируют только в смежные группы данного кубоида или в трансляционно-смежные группы другого кубоида, не перемещаясь за пределы таких смежных групп;
- миграция через несколько смежных групп возможна только по пространственным позициям газов и нулевой вакансии;
- нет качественного различия в процессах миграции через грани и ребра кубоида;
- в пределах пространственной группы химические элементы могут мигрировать в любую позицию этой группы, в том числе после их миграции из соседней группы.



Таблица 8. Минералы первого пакета (кубоид 1)
Table 8. Minerals of the first packet (cuboid 1)

Пози- ция	Минерал	I_{av}^*	Пози- ция	Минерал	I_{av}
0	–	–	48	Sopcheite $Ag_4Pd_3Te_4$	0,3329658
1	Aurihydrargyrite Au_6Hg_5	0,3318548	49	Telluropalladinite Pd_9Te_4	0,332973
2	Stistaite $SnSb$	0,3318673	50	Merenskyite $PdTe_2$	0,3329826
3	Danbaite $CuZn_2$	0,3318702	51	Lukkulaivaaraite $Pd_{14}Ag_2Te_9$	0,3330387
4	Zhanghengite $CuZn$	0,3318739	52	Drysdallite $MoSe_2$	0,3331977
5	Leadamalgam $HgPb_2$	0,3318787	53	Stilleite $ZnSe$	0,3332526
6	Taenite (Ni,Fe)	0,3319042	54	Mertieite-II $Pd_8Sb_{2.5}As_{0.5}$	0,3332632
7	Awaruite Ni_3Fe	0,331915	55	Villiaumite NaF	0,33328
8	Novodneprite $AuPb_3$	0,3319177	56	Giraudite-(Zn) $Cu_6(Cu_4Zn_2)As_4Se_{13}$	0,3334184
9	Chromferide $Fe_{1.5}Cr_{0.2}$	0,3319246	57	Krutaite, Petricekite $CuSe_2$	0,3334689
10	Tellurantimony Sb_2Te_3	0,3319252	58	Mgriite Cu_3AsSe_3	0,3334924
11	Ferchromide $Cr_{1.5}Fe_{0.2}$	0,331927	59	Nickelskutterudite (Ni,Co,Fe)As ₃	0,333493
12	Anyuiite $AuPb_2$	0,3319319	60	Skutterudite $CoAs_3$	0,3334944
13	Hunchunite Au_2Pb	0,3319327	61	Bellidoite Cu_2Se	0,3335313
14	Tetrataenite $FeNi$	0,33194	62	Berzelianite $Cu_{2-x}Se$	0,3335623
15	Laphamite As_2Se_3	0,3319471	63	Umangite Cu_3Se_2	0,3336526
16	Wairauite $CoFe$	0,3319568	64	Dienerite Ni_3As	0,3336613
17	Maldonite Au_2Bi	0,3319661	65	Klockmannite $Cu_{5.2}Se_6$	0,3336898
18	Kufahrite $PtPb$	0,331986	66	Athabascaite Cu_5Se_4	0,3336953
19	Insizwaite $PtBi_2$	0,3320079	67	Neighborite $NaMgF_3$	0,3337258
20	Shosanbetsuite Ag_3Sn	0,3321183	68	Oldhamite CaS	0,3338087
21	Allargentum $Ag_{1-x}Sb_x$	0,3321387	69	Mertieite-I $Pd_{5+x}(Sb,As)_{2-x}$	0,3338177
22	Atokite Pd_3Sn	0,3322024	70	Clinosafflorite $CoAs_2$	0,3338203
23	Dyscrasite $Ag_{3+x}Sb_{1-x}$	0,3322215	71	Orcelite $Ni_{5-x}As_2$	0,333853
24	Sylvite KCl	0,3322226	72	Krutovite, Rammelsbergite, Parammelsbergite $NiAs_2$	0,3338868
25	Stibiopalladinite Pd_5Sb_2	0,3322335	73	Sellaite MgF_2	0,3340139
26	Algodonite $Cu_{1-x}As_x$	0,3322421	74	Selenolaurite $RuSe_2$	0,3340211
27	Paolovite Pd_2Sn	0,3322671	75	Kurilite Ag_8Te_3Se	0,3340992
28	Stannopalladinite Pd_3Sn_2	0,3322994	76	Langisite Modderite $CoAs$	0,3341138
29	Chlorocalcite $KCaCl_3$	0,3323182	77	Maucherite $Ni_{11}As_8$	0,3341555
30	Sluzhenikinite $Pd_{15}(Sb_{7-x}Sn_x)$	0,3323686	78	Nickeline $NiAs$	0,334191
31	N_2O_5	0,3324057	79	Cryolite Na_2NaAlF_6	0,3342192
32	Naldrettite Pd_2Sb	0,3324884	80	Tyrrellite $Cu(Co,Ni)_2Se_4$	0,3342744
33	Ungavaite Pd_4Sb_3	0,3325496	81	Miessiite $Pd_{11}Te_2Se_2$	0,3342766
34	Sudburyite $PdSb$	0,3325607	82	Ferroskutterudite $FeAs_3$	0,3342924
35	Lingbaoite $AgTe_3$	0,3326619	83	Viteite Pd_5InAs	0,3343241
36	Domeykite, Domeykite- β Cu_3As	0,3326648	84	Weberite Na_2MgAlF_7	0,3343369
37	Koutekite Cu_5As_2	0,3327348	85	Chlormanganokalite K_4MnCl_6	0,3343961
38	Kojonenite $Pd_{7-x}SnTe_2$	0,3327627	86	Palarstanide $Pd_5(Sn,As)_2$	0,3344
39	Paxite $CuAs_2$	0,3327829	87	Jolliffeite $NiAsSe$	0,3344182
40	Telargpalite $(Pd,Ag)_3Te$	0,3328342	88	Qingsongite BN	0,3344851
41	Hessite Ag_2Te	0,3328497	89	Oregonite $FeNi_2As_2$	0,3344927
42	Keithconnite $Pd_{20}Te_7$	0,3328664	90	Isomertieite $Pd_{11}Sb_2As_2$	0,3345081
43	Miersite, Iodargyrite AgI	0,3328879	91	Chiolite $Na_5Al_3F_{14}$	0,3345597
44	Stützite $Ag_{5-x}Te_3$	0,332915	92	Zaykovite Rh_3Se_4	0,3345709
45	Empressite $AgTe$	0,3329592	93	CO_2	0,3346444
46	Minakawaite $RhSb$	0,3329625	94	Penroseite $(Ni,Co,Cu)Se_2$	0,3346848
47	Borovskite Pd_3SbTe_4	0,3329655	95	Nickelytyrrellite $CuNi_2Se_4$	0,3347119

Примечание. * Здесь и далее (табл. 8–15) I_{av} – среднее значение массива 4,2 млрд симметризованных информационных коэффициентов пропорциональности I_p атомных весов.



Таблица 9. Минералы второго пакета (кубоид 2)
Table 9. Minerals of the second packet (cuboid 2)

Пози- ция	Минерал	I_{av}	Пози- ция	Минерал	I_{av}
0	–	–	48	Sylvanite $AgAuTe_4$	0,3374623
1	Malladrite Na_2SiF_6	0,3347411	49	Patrónite VS_4	0,3375442
2	Trogtalite $CoSe_2$	0,3347589	50	Rinneite $K_3NaFe^{2+}Cl_6$	0,3375691
3	Löllingite $FeAs_2$	0,334782	51	Jagüéite $Cu_2Pd_3Se_4$	0,3377039
4	Kullerudite $NiSe_2$	0,3348387	52	Tocornalite $(Ag,Hg)I$	0,3378406
5	Niningerite MgS	0,3348577	53	Shuangfengite rTe_2	0,3378473
6	Tornroosite $Pd_{11}As_2Te_2$	0,3348752	54	Chaméanite $(Cu,Fe)_4As(Se,S)_4$	0,3378658
7	Verbeekite $PdSe_2$	0,3350294	55	Wassonite TiS	0,3380863
8	Novakite $(Cu,Ag)_{21}As_{10}$	0,3350502	56	Molysite $FeCl_3$	0,3381958
9	Anduoite $RuAs_2$	0,3350521	57	Selenopalpaite Ag_3CuSe_2	0,3382436
10	CO	0,3350726	58	Svetlanaite $SnSe$	0,3382946
11	Bornhardtite $Co^{2+}Co^{3+}_2Se_4$	0,3351023	59	Weishanite (Au,Ag,Hg)	0,3383366
12	Naumannite Ag_2Se	0,3351426	60	Honeaite Au_3TiTe_2	0,3383826
13	Trüstedtite, Wilkmanite Ni_3Se_4	0,3351922	61	Krennerite Au_3AgTe_8	0,3384264
14	Freboldite $CoSe$	0,3352063	62	Permingeatite Cu_3SbSe_4	0,3384491
15	Mackinawite $(Fe,Ni)_{1+x}S$	0,3352234	63	Montbrayite $(Au,Ag,Sb,Bi,Pb)_{23}(Te,Sb,Bi,Pb)_{38}$	0,3384824
16	Westerveldite $FeAs$	0,3352332	64	Rustenburgite Pt_3Sn	0,3385277
17	Eskebornite $CuFeSe_2$	0,3352518	65	Calaverite $AuTe_2$	0,3385792
18	Rhodarsenide Rh_2As	0,3352577	66	Periclase MgO	0,3386249
19	Vincentite Pd_3As	0,3352951	67	Norbergite $Mg_3(SiO_4)F_2$	0,3386605
20	Mäkinenite, Sederholmite $NiSe$	0,3352995	68	Scacchite $MnCl_2$	0,3387015
21	Palladseite $Pd_{17}Se_{15}$	0,3353051	69	Mayingite $IrBiTe$	0,3387814
22	Bromargyrite $AgBr$	0,3353766	70	Mitrofanovite Pt_3Te_4	0,3387938
23	Chrisstanleyite $Ag_2Pd_3Se_4$	0,3353904	71	Maslovite $PtBiTe$	0,3389295
24	Polkanovite $Rh_{12}As_7$	0,3354387	72	Kutinaite $Ag_6Cu_{14}As_7$	0,3389304
25	Paradocrasite $Sb_2(Sb,As)_2$	0,3354737	73	Antimonoselite Sb_2Se_3	0,3389695
26	Arsenopalladinite Stillwaterite Pd_8As_3	0,3355093	74	Temagamite Pd_3HgTe_3	0,3389723
27	Oskarssonite AlF_3	0,3356194	75	Flinteite K_2ZnCl_4	0,3390834
28	Kalungaite $PdAsSe$	0,335682	76	Halite $NaCl$	0,3391047
29	Colimaite K_3VS_4	0,3357448	77	Badengzhuite TiP	0,3391771
30	Cherepanovite $RhAs$	0,3357896	78	Lawrencite $FeCl_2$	0,3392194
31	Oosterboschite $(Pd,Cu)_7Se_5$	0,3358517	79	Eucairite $CuAgSe$	0,339221
32	Ferroselite Dzharckenite $FeSe_2$	0,3358929	80	Hedleyite Bi_7Te_3	0,3393222
33	Palladodymite Palladoarsenide Pd_2As	0,3359944	81	Petzite Ag_3AuTe_2	0,3393308
34	Marathonite $Pd_{25}Ge_9$	0,3360717	82	Pampaloite $AuSbTe$	0,339367
35	Selenostephanite Ag_5SbSe_4	0,3361253	83	Bytízite Cu_3SbSe_3	0,339374
36	Nitratine $Na(NO_3)$	0,3363709	84	Yixunite Pt_3In	0,3393908
37	Achávalite $FeSe$	0,3365349	85	Chondrodite $Mg_5(SiO_4)_2F_2$	0,3394478
38	Chloromagnesite $MgCl_2$	0,3366217	86	Mazzettite $Ag_3HgPbSbTe_5$	0,3395062
39	Cadmoselite $CdSe$	0,3367125	87	Kotulskite $Pd(Te,Bi)_{2-x}$	0,3395219
40	Palladogermanide Pd_2Ge	0,3367341	88	Ferruccite $NaBF_4$	0,3395652
41	Rutheniridosmine (Ir,Os,Ru)	0,3367458	89	Coloradoite $HgTe$	0,3397478
42	Milotaite $PdSbSe$	0,3368453	90	Geversite $PtSb_2$	0,3397735
43	Javorieite $KFeCl_3$	0,3369607	91	Muthmannite $AuAgTe_2$	0,3398608
44	Ruthenarsenite $(Ru,Ni)As$	0,3371632	92	Magnesite $Mg(CO_3)$	0,339871
45	Fluornatrocoulsellite $(Na_{1.5}Ca_{0.5})(Mg_{1.5}Al_{0.5})F_6F$	0,3372559	93	Gregoryite Natrite $Na_2(CO_3)$	0,3398813
46	Gaotaiite Ir_3Te_8	0,3372744	94	Moschelite HgI	0,3399344
47	Saltonseaitite $K_3NaMnCl_6$	0,3373579	95	Clinohumite $Mg_9(SiO_4)_4F_2$	0,3399504



Таблица 10. Минералы третьего пакета (кубоид 3)
Table 10. Minerals of the third packet (cuboid 3)

Пози- ция	Минерал	I_{av}	Пози- ция	Минерал	I_{av}
0	—	—	48	Trinepheline NaAlSiO_4	0,3413434
1	Eitelite $\text{Na}_2\text{Mg}(\text{CO}_3)_2$	0,3399623	49	Schreibersite $(\text{Fe},\text{Ni})_3\text{P}$	0,3414485
2	Mellizinkalite $\text{K}_3\text{Zn}_2\text{Cl}_7$	0,3400204	50	Heklaite KNaSiF_6	0,3414618
3	Nielsenite PdCu_3	0,3400211	51	Kononovite $\text{NaMg}(\text{SO}_4)\text{F}$	0,3414719
4	Zaccariniite RhNiAs	0,3400614	52	Galeite $\text{Na}_{15}(\text{SO}_4)_5\text{ClF}_4$	0,3415342
5	Genkinite Pt_4Sb_3	0,3400886	53	Pyrope Jeffbenite $\text{Mg}_3\text{Al}_2(\text{SiO}_4)_3$ $\text{Mg}_3\text{Al}_2\text{Si}_3\text{O}_{12}$	0,3415353
6	Aurostibite AuSb_2	0,3400964	54	Joegoldsteinite MnCr_2S_4	0,3415415
7	Natroxalate $\text{Na}_2(\text{C}_2\text{O}_4)$	0,3401195	55	Sapphirine $\text{Mg}_4(\text{Mg}_3\text{Al}_9)\text{O}_4[\text{Si}_3\text{Al}_9\text{O}_{36}]$	0,3415616
8	Moraskoite $\text{Na}_2\text{Mg}(\text{PO}_4)\text{F}$	0,3401237	56	Rasvumite KFe_2S_3	0,3415957
9	Eliopoulosite V_7S_8	0,3401437	57	Yuanjiangite AuSn	0,3416768
10	Cabriite Pd_2CuSn	0,3403157	58	Palladobismutharsenide $\text{Pd}_2(\text{As},\text{Bi})$	0,3416808
11	Elgoresyite $(\text{Mg}_5\text{Si}_2)\text{O}_9$	0,3403163	59	Bradleyite $\text{Na}_3\text{Mg}(\text{PO}_4)(\text{CO}_3)$	0,3416863
12	Fluorborite $\text{Mg}_3(\text{BO}_3)\text{F}_3$	0,3403199	60	Volynskite AgBiTe_2	0,341732
13	Eugenite $\text{Ag}_{11}\text{Hg}_2$	0,3403236	61	Bortnikovite $\text{Pd}_4\text{Cu}_3\text{Zn}$	0,3417672
14	Nipalarsite $\text{Ni}_8\text{Pd}_3\text{As}_4$	0,3403725	62	Ertixiite $\text{Na}_2\text{Si}_4\text{O}_9$	0,3417788
15	Sanguite KCuCl_3	0,3403728	63	Zolenskyite Daubreelite FeCr_2S_4	0,3417821
16	Kogarkoite $\text{Na}_3(\text{SO}_4)\text{F}$	0,3404053	64	Lacroixite $\text{NaAl}(\text{PO}_4)\text{F}$	0,3418332
17	Stumpflite PtSb	0,3404053	65	Damiaoite PtIn_2	0,3418418
18	Menshikovite $\text{Pd}_3\text{Ni}_2\text{As}_3$	0,3404854	66	Burkeite $\text{Na}_4(\text{SO}_4)(\text{CO}_3)$	0,3418458
19	Forsterite Poirierite Ringwoodite Wadsleyite Mg_2SiO_4	0,3405559	67	Diaoyudaoite $\text{NaAl}_{11}\text{O}_{17}$	0,3418536
20	Nataliyamalikit TII	0,3405882	68	Jadeite $\text{NaAlSi}_2\text{O}_6$	0,3418761
21	Topaz $\text{Al}_2\text{SiO}_4\text{F}_2$	0,3406228	69	Andreyivanovite FeCrP	0,341904
22	Bambollaite $\text{Cu}(\text{Se},\text{Te})_2$	0,3406502	70	Zhiginite TiSi_2	0,3419576
23	Melliniite $(\text{Ni},\text{Fe})_4\text{P}$	0,3407021	71	Kalgorlieite As_2Te_3	0,3419694
24	Pribramite CuSbSe_2	0,3407366	72	Knasibfite $\text{K}_3\text{Na}_4(\text{SiF}_6)_3(\text{BF}_4)$	0,341987
25	Heideite $(\text{Fe},\text{Cr})_{1.15}(\text{Ti},\text{Fe})_2\text{S}_4$	0,3407484	73	Skaergaardite PdCu	0,3420273
26	Michitoshiite-(Cu) $\text{Rh}(\text{Cu}_{1-x}\text{Ge}_x)$	0,3407848	74	Pertsevite-(F) $\text{Mg}_2(\text{BO}_3)\text{F}$	0,3420351
27	Brezinaite Cr_3S_4	0,3408142	75	Yagiite $\text{NaMg}_2(\text{AlMg}_2\text{Si}_{12})\text{O}_{30}$	0,3421026
28	Pilsenite Bi_4Te_3	0,3408419	76	Corundum Al_2O_3	0,3421522
29	Murchisite Cr_5S_6	0,3408663	77	Albite Lingunite Kumdykolite $\text{Na}(\text{AlSi}_3\text{O}_8)$	0,3421602
30	Altaite PbTe	0,3408833	78	Hauerite MnS_2	0,3421604
31	Natrosilite $\text{Na}_2\text{Si}_2\text{O}_5$	0,3408913	79	Cordierite Indialite $\text{Mg}_2\text{Al}_4\text{Si}_5\text{O}_{18}$ $\text{Mg}_2\text{Al}_3(\text{AlSi}_5)\text{O}_{18}$	0,3421673
32	Stibarsen SbAs	0,3408913	80	Nuwaite Ni_6GeS_2	0,3421673
33	Moncheite $\text{Pt}(\text{Te},\text{Bi})_2$	0,3409132	81	Bartonite $\text{K}_6\text{Fe}_{20}\text{S}_{26}\text{S}$	0,3422083
34	Rumoiite AuSn_2	0,340937	82	Thenardite Metathénardite $\text{Na}_2(\text{SO}_4)$	0,3423289
35	Tellurobismuthite Bi_2Te_3	0,3409786	83	Chlorbartonite $\text{K}_6\text{Fe}_{24}\text{S}_{26}\text{Cl}$	0,3423325
36	Rucklidgeite PbBi_2Te_4	0,3410529	84	Mullite $\text{Al}^{4+}_{2x}\text{Si}^{2-}_{2x}\text{O}_{10-x}$	0,3424251
37	Kochkarite PbBi_4Te_7	0,3410682	85	Davidsmithite $(\text{Ca}, \text{)}_2\text{Na}_6\text{Al}_8\text{Si}_8\text{O}_{32}$	0,342432
38	Fluoro-nyboite $\text{NaNa}_2(\text{Mg}_3\text{Al}_2)(\text{Si}_7\text{Al})\text{O}_{22}\text{F}_2$	0,3410684	86	Nickelphosphide Ni_3P	0,3424767
39	Florenskyite FeTiP	0,3410784	87	Andalusite Sillimanite Al_2SiO_5 Kyanite Al_2OSiO_4	0,3425007
40	Majakite PdNiAs	0,341081	88	Gmalimite $\text{K}_6\text{Fe}_{24}\text{S}_{27}$	0,3425179
41	Spinel MgAl_2O_4	0,3411225	89	Vanthoffite $\text{Na}_6\text{Mg}(\text{SO}_4)_4$	0,3425366
42	Wagnerite $\text{Mg}_2(\text{PO}_4)\text{F}$	0,341153	90	Fluoro-richterite $\text{Na}(\text{NaCa})\text{Mg}_5\text{Si}_8\text{O}_{22}\text{F}_2$	0,3427104



43	Tychite $\text{Na}_6\text{Mg}_2(\text{CO}_3)_4(\text{SO}_4)$	0,3411652	91	Farringtonite Chopinite $\text{Mg}_3(\text{PO}_4)_2$	0,3427306
44	Tsumoite BiTe	0,3411889	92	Pyrite Marcasite FeS_2	0,3427439
45	Niggliite PtSn	0,3411946	93	Grammatikopoulosite NiVP	0,3427859
46	Majorite $\text{Mg}_3(\text{MgSi})(\text{SiO}_4)_3$	0,3413198	94	Sodalite $\text{Na}_4(\text{Si}_3\text{Al}_3)\text{O}_{12}\text{Cl}$	0,3428212
47	Enstatite Protoenstatite Clinoenstatite (Akimotoite Bridgmanite) $\text{Mg}_2\text{Si}_2\text{O}_6$ (MgSiO_3)	0,3413199	95	Deltalumite $(\text{Al}_{0.67} \text{ } 0.33)\text{Al}_2\text{O}_4$	0,342836

Таблица 11. Минералы четвертого пакета (кубоид 4)

Table 11. Minerals of the fourth packet (cuboid 4)

Позиция	Минерал	I_{av}	Позиция	Минерал	I_{av}
0	—	—	48	Hibonite $\text{CaAl}_{12}\text{O}_{19}$	0,3442184
1	Alabandite Rambergite Browneite MnS	0,3429182	49	Kahlenbergite $\text{KAl}_{11}\text{O}_{17}$	0,3442449
2	Fluoro-taramite $\text{Na}(\text{NaCa})(\text{Mg}_3\text{Al}_2)(\text{Si}_6\text{Al}_2)\text{O}_{22}\text{F}_2$	0,3429189	50	Lazurite $\text{Na}_7\text{Ca}(\text{Al}_6\text{Si}_6\text{O}_{24})(\text{SO}_4)(\text{S}_3)^{1-}\text{H}_2\text{O}$	0,3442497
3	Suanite $\text{Mg}_2\text{B}_2\text{O}_5$	0,3429827	51	Magnesiotaaffeite-6N'3S $\text{Mg}_2\text{BeAl}_6\text{O}_{12}$	0,3442955
4	Kotoite $\text{Mg}_3(\text{BO}_3)_2$	0,3430273	52	Chladniite $\text{Na}_2\text{CaMg}_7(\text{PO}_4)_6$	0,3443508
5	Marialite $\text{Na}_4\text{Al}_3\text{Si}_9\text{O}_{24}\text{Cl}$	0,3430421	53	Bromellite BeO	0,3443529
6	Eifelite $\text{KNa}_2(\text{MgNa})(\text{Mg}_3\text{Si}_{12})\text{O}_{30}$	0,3430609	54	Lisette $\text{Na}_2\text{CaAl}_4(\text{SiO}_4)_4$	0,3444318
7	Sulphohalite $\text{Na}_6(\text{SO}_4)_2\text{ClF}$	0,3430718	55	Jeremejevitte $\text{Al}_6(\text{BO}_3)_5\text{F}_3$	0,3444971
8	Quartz Stishovite Tridymite Seifertite Lechatelierite Cristobalite Coesite SiO_2	0,3430874	56	Fluoro-edenite $\text{NaCa}_2\text{Mg}_5(\text{Si}_7\text{Al})\text{O}_{22}\text{F}_2$	0,3445001
9	Monchetundraite Pd_2NiTe_2	0,34309	57	Pentlandite $(\text{Ni},\text{Fe})_9\text{S}_8$	0,3445041
10	Aluminomagnesiohulsite $\text{Mg}_2\text{AlO}_2(\text{BO}_3)$	0,3431909	58	Eirikite $\text{KNa}_6\text{Be}_2(\text{Si}_{15}\text{Al}_3)\text{O}_{39}\text{F}_2$	0,34453
11	Allabogdanite $(\text{Fe},\text{Ni})_2\text{P}$	0,3432298	59	Berlinite $\text{Al}(\text{PO}_4)$	0,344535
12	Roedderite $\text{KNaMg}_2(\text{Mg}_3\text{Si}_{12})\text{O}_{30}$	0,3432881	60	Schlemaite $(\text{Cu}, \text{ })_6(\text{Pb},\text{Bi})\text{Se}_4$	0,3445485
13	Boromullite $\text{Al}_9\text{BSi}_2\text{O}_{19}$	0,3433485	61	Sugakiite $\text{Cu}(\text{Fe},\text{Ni})_8\text{S}_8$	0,3445556
14	Khmaralite $\text{Mg}_4(\text{Mg}_3\text{Al}_9)\text{O}_4[\text{Si}_5\text{Be}_2\text{Al}_5\text{O}_{36}]$	0,3434035	62	Fluoro-pargasite $\text{NaCa}_2(\text{Mg}_4\text{Al})(\text{Si}_6\text{Al}_2)\text{O}_{22}\text{F}_2$	0,3445858
15	Verneite $\text{Na}_2\text{Ca}_3\text{Al}_2\text{F}_{14}$	0,3434075	63	Michenerite PdBiTe	0,3446104
16	Barringerite $(\text{Fe},\text{Ni})_2\text{P}$	0,343482	64	Shenzhuangite NiFeS_2	0,3446524
17	Dumortierite $\text{AlAl}_6\text{BSi}_3\text{O}_{18}$	0,3435027	65	Kalininite ZnCr_2S_4	0,3446663
18	Magnesiotaaffeite-2N2S $\text{Mg}_3\text{BeAl}_8\text{O}_{16}$	0,3435518	66	Parascandolaite KMgF_3	0,3446899
19	Greigite $\text{Fe}^{2+}\text{Fe}^{3+}_2\text{S}_4$	0,3435704	67	Haüyne $\text{Na}_3\text{Ca}(\text{Si}_3\text{Al}_3)\text{O}_{12}(\text{SO}_4)$	0,3446905
20	Troilite Keilite FeS	0,3435733	68	Boralsilite $\text{Al}_{16}\text{B}_6\text{O}_{30}(\text{Si}_2\text{O}_7)$	0,3446915
21	Pyrrhotite Fe_7S_8	0,343632	69	Heazlewoodite Ni_3S_2	0,3447164
22	Luanheite Ag_3Hg	0,3436531	70	Nantokite CuCl	0,3447593
23	Grandidierite $\text{MgAl}_3\text{O}_2(\text{BO}_3)(\text{SiO}_4)$	0,3437134	71	Vaesite NiS_2	0,3447892
24	Fluorophlogopite $\text{KMg}_3(\text{Si}_3\text{Al})\text{O}_{10}\text{F}_2$	0,34377	72	Transjordanite Orishchinite Ni_2P	0,3447946
25	Hanksite $\text{KNa}_{22}(\text{SO}_4)_9(\text{CO}_3)_2\text{Cl}$	0,3437761	73	Fluoro-tremolite $\text{Ca}_2\text{Mg}_5\text{Si}_8\text{O}_{22}\text{F}_2$	0,344866
26	Osumilite-(Mg) $\text{KMg}_2\text{Al}_3(\text{Al}_2\text{Si}_{10})\text{O}_{30}$	0,3437988	74	Palladothallite Pd_3Ti	0,344895
27	Nazarovite Ni_{12}P_5	0,3438004	75	Taimyrite-I $(\text{Pd},\text{Pt})_9\text{Cu}_3\text{Sn}_4$	0,3449049
28	D'ansite $\text{Na}_{21}\text{Mg}(\text{SO}_4)_{10}\text{Cl}_3$	0,3438069	76	Elpasolite K_2NaAlF_6	0,3449394
29	Shirokshinite $\text{K}(\text{Mg}_2\text{Na})\text{Si}_4\text{O}_{10}\text{F}_2$	0,3438421	77	Cattierite CoS_2	0,3449602
30	Jakobssonite CaAlF_5	0,343845	78	Caswellsilverite NaCrS_2	0,3449786
31	Surinamite $\text{Mg}_3\text{Al}_3\text{O}(\text{Si}_3\text{BeAlO}_{15})$	0,3438589	79	Violarite FeNi_2S_4	0,3450044
32	Nepheline $\text{Na}_3\text{K}(\text{Al}_4\text{Si}_4\text{O}_{16})$	0,3438594	80	Murashkoite FeP	0,3450051
33	Tolbachite CuCl_2	0,3439217	81	Magnesium-fluoro-arfvedsonite $\text{NaNa}_2(\text{Mg}_4\text{Fe}^{3+})\text{Si}_8\text{O}_{22}\text{F}_2$	0,3451343



34	Werdingtonite $Mg_2Al_{14}Si_4B_4O_{37}$	0,3439317	82	Vozhminite Ni_4AsS_2	0,3452117
35	Fluoro-leakeite $NaNa_2(Mg_2Al_2Li)Si_8O_{22}F_2$	0,3439511	83	Huntite $CaMg_3(CO_3)_4$	0,3452206
36	Gupeite Suessite Fe_3Si	0,3439995	84	Naujakasite $Na_6Fe^{2+}Al_4Si_8O_{26}$	0,3452297
37	Sinhalite $MgAl(BO_4)$	0,3440261	85	Kieffertite $CoSb_3$	0,345241
38	Reedmergnerite $NaBSi_3O_8$	0,3440578	86	Godlevskite $(Ni,Fe)_9S_8$	0,3452794
39	Cuprokalininite $CuCr_2S_4$	0,3440699	87	Samaniite $Cu_2Fe_5Ni_2S_8$	0,3453154
40	Malinkoite $NaBSiO_4$	0,3441427	88	Perryite $(Ni,Fe)_8(Si,P)_3$	0,3453294
41	Vranaite $Al_{16}B_4Si_4O_{38}$	0,3441439	89	Millosevichite $Al_2(SO_4)_3$	0,3453416
42	Djerfisherite $K_6(Fe,Cu,Ni)_{25}S_{26}Cl$	0,3441538	90	Moschellandsbergite Ag_2Hg_3	0,3453465
43	Horomanite $Fe_6Ni_3S_8$	0,3441559	91	Zvyagintsevite Pd_3Pb	0,3454403
44	Zuktamurite FeP_2	0,3441577	92	Crowningshieldite $(Ni_{0.9}Fe_{0.1})S$	0,3454656
45	Yangzhumingite $KMg_{2.5}Si_4O_{10}F_2$	0,3441598	93	Northupite $Na_3Mg(CO_3)_2Cl$	0,3454956
46	Smythite $(Fe,Ni)_{3+x}S_4$	0,3441724	94	Murunskite $K_2(Cu,Fe)_4S_4$	0,3455558
47	Pasavaite $Pd_3Pb_2Te_2$	0,3442098	95	Carletonmooreite Ni_3Si	0,34562

Таблица 12. Минералы пятого пакета (кубид 5)
Table 12. Minerals of the fifth packet (cuboid 5)

Пози- ция	Минерал	I_{av}	Пози- ция	Минерал	I_{av}
0	—	—	48	Duranusite As_4S	0,346628
1	Grokhovskyite $CuCrS_2$	0,3456444	49	Hapkeite Fe_2Si	0,3466399
2	Henryite $(Cu,Ag)_{3+x}Te_2$	0,3456452	50	Chalcopyrite $CuFeS_2$	0,3466778
3	Millerite NiS	0,3456622	51	Djurleite $Cu_{31}S_{16}$	0,3467017
4	Poudretteite $KNa_2(B_3Si_{12})O_{30}$	0,3456655	52	Halamishite Ni_5P_4	0,3467379
5	Cobaltpentlandite Co_9S_8	0,3456663	53	Talnakhite $Cu_9Fe_8S_{16}$	0,3467706
6	Polydymite $Ni^{2+}Ni^{3+}_2S_4$	0,345683	54	Potassic-magnesian-fluoro-arfvedsonite $KNa_2(Mg_4Fe^{3+})Si_8O_{22}F_2$	0,3467969
7	Cubanite Isocubanite $CuFe_2S_3$	0,3456989	55	Sorosite $Cu_{1+x}(Sn,Sb)$	0,3468466
8	Siegenite $CoNi_2S_4$	0,3457437	56	Quadridavyne $[(Na,K)_6Cl_2][Ca_2Cl_2][(Si_6Al_6O_{24})]$	0,3468494
9	Grimmite $NiCo_2S_4$	0,3458028	57	Buseckite $(Fe,Zn,Mn)S$	0,3468909
10	Jaipurite CoS	0,3458399	58	Potarite $PdHg$	0,3469535
11	Tugtupite $Na_4BeAlSi_4O_{12}Cl$	0,3458517	59	Rorisite $CaClF$	0,3469731
12	Linnaeite $Co^{2+}Co^{3+}_2S_4$	0,3458629	60	Fletcherite $CuNi_2S_4$	0,3469758
13	Viitaniemiite $NaCaAl(PO_4)F_3$	0,3459101	61	Mavlyanovite Mn_5Si_3	0,3469768
14	Addischoffite $Ca_2Al_6Al_6O_{20}$	0,3459368	62	Nisnite Ni_3Sn	0,3470078
15	Oenite $CoSbAs$	0,3459823	63	Fukuchilite Cu_3FeS_8	0,3470142
16	Tissintite $(Ca,Na,)AlSi_2O_6$	0,3459798	64	Brianite $Na_2CaMg(PO_4)_2$	0,3470542
17	Friedrichbeckite $K(Na)Mg_2(Be_2Mg)Si_{12}O_{30}$	0,3459885	65	Carrollite $CuCo_2S_4$	0,3470888
18	Chkalovite $Na_2BeSi_2O_6$	0,3460177	66	Digenite $Cu_{1.8}S$	0,347119
19	Urvantsevite $Pd(Bi,Pb)_2$	0,3460706	67	Roxbyite $Cu_{1.78}S$	0,3471802
20	Simmonsite Na_2LiAlF_6	0,3460787	68	Natroaphthalite $KNa_3(SO_4)_2$	0,347188
21	Donwilhelmsite $CaAl_4Si_2O_{11}$	0,3461219	69	Kostovite $AuCuTe_4$	0,3471975
22	Spiridonovite $(Cu_{1-x}Ag_x)_2Te$	0,3461417	70	Abuite $CaAl_2(PO_4)_2F_2$	0,3471983
23	Froodite $PdBi_2$	0,3461522	71	Rhodizite $KBe_4Al_4(B_{11}Be)O_{28}$	0,3472074
24	Haycockite $Cu_4Fe_5S_8$	0,3461984	72	Anilite Cu_7S_4	0,3472722
25	Potassic-fluoro-pargasite $KCa_2(Mg_4Al)Si_6Al_2O_{22}F_2$	0,3462074	73	Serendibite $Ca_4[Mg_6Al_6]O_4[Si_6B_3Al_3O_{36}]$	0,3473039
26	Paraschachnerite Ag_3Hg_2	0,3462203	74	Kitagohaite Pt_7Cu	0,3473294
27	Fluoro-cannilloite $CaCa_2(Mg_4Al)(Si_5Al_3)O_{22}F_2$	0,3462548	75	Bornite Cu_5FeS_4	0,3473407
28	Negevite NiP_2	0,3462658	76	Grossite $CaAl_4O_7$	0,347381
29	Afghanite $(Na,K)_{22}Ca_{10}(Si_{24}Al_{24})O_{96}(SO_4)_6Cl_6$	0,3462683	77	Orthoclase Microcline Kokcheta-vite Liebermannite Sanidine $K(AlSi_3O_8)$	0,347424



30	Trembathite Boracite $Mg_3B_7O_{13}Cl$	0,3463109	78	Sulvanite Cu_3VS_4	0,3475117
31	Koryakite $NaKMg_2Al_2(SO_4)_6$	0,3463348	79	Kitkaite $NiTeSe$	0,347523
32	Putoranite $Cu_{1.1}Fe_{1.2}S_2$	0,3463518	80	Anorthite Stöfflerite Svyatoslavite Dmisteinbergite $CaAl_2Si_2O_8$	0,3475726
33	Laurentthomasite $Mg_2K(Be_2Al)Si_{12}O_{30}$	0,3463802	81	Nacaphite $Na_2Ca(PO_4)F$	0,3475943
34	Liottite $Na_{16}Ca_8Si_{18}Al_{18}O_{72}(SO_4)_5Cl_4$	0,3463876	82	Luobusaite $Fe_{0.8}4Si_2$	0,3476244
35	Clinophosinaite $Na_3Ca(SiO_3)(PO_4)$	0,3463943	83	Trikalsilite $K_2NaAl_3(SiO_4)_3$	0,347629
36	Rudashevskyite $(Fe,Zn)S$	0,3463957	84	Omphacite $(Ca,Na)(Mg,Fe,Al)Si_2O_6$	0,34765
37	Zangboite $TiFeSi_2$	0,3464214	85	Bubnovaite $K_2Na_8Ca(SO_4)_6$	0,3476522
38	Schachnerite $Ag_{1.1}Hg_{0.9}$	0,3464328	86	Xifengite Fe_5Si_3	0,347663
39	Sbacchiite Ca_2AlF_7	0,346479	87	Geerite Cu_8S_5	0,3477332
40	Dobrovolskyite $Na_4Ca(SO_4)_3$	0,3465134	88	Potassic-jeanlouisite $K(NaCa)(Mg_4Ti)Si_8O_{22}O_2$	0,3477394
41	Mooihoekite $Cu_9Fe_9S_{16}$	0,3465141	89	Olympite $LiNa_5(PO_4)_2$	0,3477576
42	Chalcocite Wuyanzhiite Cu_2S	0,3465149	90	Kaersutite $NaCa_2(Mg_3AlTi^{4+})(Si_6Al_2)O_{22}O_2$	0,3478646
43	Demartinite Hieratite K_2SiF_6	0,3465165	91	Sinoite Si_2N_2O	0,347898
44	Zagamiite $CaAl_2Si_{3.5}O_{11}$	0,3465211	92	Norilskite $(Pd,Ag)_7Pb_4$	0,3479373
45	Dzierzanowskite $CaCu_2S_2$	0,3465282	93	Cameronite $Cu_{5-x}(Cu,Ag)_{3+x}Te_{10}$	0,3479585
46	Koashvite $CaCu_2S_2$	0,3466119	94	Beryl $Be_3Al_2Si_6O_{18}$	0,3479599
47	SO_3	0,3466188	95	Hollisterite Al_3Fe	0,3479949

Таблица 13. Минералы шестого пакета (кубоид 6)

Table 13. Minerals of the sixth packet (cuboid 6)

Пози- ция	Минерал	I_{av}	Пози- ция	Минерал	I_{av}
0	—	—	48	Arsenopyrite $FeAsS$	0,3496052
1	Idaite Cu_3FeS_4	0,3480439	49	Zlatogorite $CuNiSb_2$	0,3496483
2	Potassic-chloro-pargasite $KCa_2(Mg_4Al)(Si_6Al_2)O_{22}Cl_2$	0,3481788	50	Marshite CuI	0,3496511
3	Narsarsukite $Na_2(Ti,Fe^{3+})Si_4(O,F)_{11}$	0,3482828	51	Balliranoite $(Na,K)_6Ca_2(Si_6Al_6O_{24})Cl_2(CO_3)$	0,3496808
4	Villamaninite CuS_2	0,3482975	52	Tainiolite $KLiMg_2Si_4O_{10}F_2$	0,3497057
5	Mangani-obertiite $NaNa_2(Mg_3Mn^{3+}Ti^{4+})Si_8O_{22}O_2$	0,3483033	53	Geffroyite $(Cu,Fe,Ag)_9Se_8$	0,3497097
6	Panunzite $K_3Na(AlSiO_4)_4$	0,3483225	54	Quadruhphe $Na_6Na_2(CaNa)_2Na_2Ti_2Na_2Ti_2$ $(Si_2O_7)_2(PO_4)_4O_4F_2$	0,3497448
7	Plumbopalladinite Pd_3Pb_2	0,3483341	55	Omariniite $Cu_8Fe_2ZnGe_2S_{12}$	0,3497606
8	Nisbite $NiSb_2$	0,348338	56	Glaucodot $(Co_{0.5}Fe_{0.5})AsS$	0,3497648
9	Spionkopite $Cu_{39}S_{28}$	0,3483554	57	Gersdorffite-P213 Gersdorffite- Pa3 Gersdorffite-Pca21 $NiAsS$	0,349868
10	Davyne $[(Na,K)_6(SO_4)_{0.5}Cl][Ca_2Cl_2]$ $[(Si_6Al_6O_{24})]$	0,3484004	58	Stanfieldite $Ca_4Mg_5(PO_4)_6$	0,3498905
11	Diopside $CaMgSi_2O_6$	0,3484358	59	Cobaltite Allocasite $CoAsS$	0,3498961
12	Ferri-obertiite $NaNa_2(Mg_3Fe^{3+}Ti)Si_8O_{22}O_2$	0,348442	60	Vulcanite $CuTe$	0,3499154
13	Linzhiite $FeSi_2$	0,348446	61	Nierite Si_3N_4	0,3499288
14	Magnesio-fluoro-hastingsite $NaCa_2(Mg_4Fe^{3+})(Si_6Al_2)O_{22}F_2$	0,3484643	62	Beryllonite $NaBe(PO_4)$	0,3499354
15	Leucite $K(AlSi_2O_6)$	0,3485116	63	Rickardite $Cu_{3-x}Te_2$	0,3499416
16	Maletoyvayamite $Au_3Se_4Te_6$	0,3485367	64	Oberthürte $Rh_3Ni_{32}S_{32}$	0,3499712
17	Nukundamite $Cu_{3.4}Fe_{0.6}S_4$	0,3485547	65	Sabatierite Cu_6TiSe_4	0,3499922



18	Silvialite $\text{Ca}_4\text{Al}_6\text{Si}_6\text{O}_{24}(\text{SO}_4)$	0,3486327	66	Capranicaite $\text{KCaNaAl}_4\text{B}_4\text{Si}_2\text{O}_{18}$	0,3500693
19	Glauberite $\text{Na}_2\text{Ca}(\text{SO}_4)_2$	0,3486406	67	Briartite $\text{Cu}_2\text{FeGeS}_4$	0,3500878
20	Brownleeite MnSi	0,3486643	68	Polyphite $\text{Na}_6(\text{Na}_4\text{Ca}_2)_2\text{Na}_2\text{Ti}_2\text{Na}_2\text{Ti}_2(\text{Si}_2\text{O}_7)_2$ $(\text{PO}_4)_6\text{O}_4\text{F}_4$	0,3501006
21	Kushiroite $\text{CaAl}_2\text{SiO}_6$	0,3487114	69	Mattagamite CoTe_2	0,3501171
22	Polarite $\text{Pd}(\text{Bi,Pb})$	0,3487471	70	Dolomite $\text{CaMg}(\text{CO}_3)_2$	0,3501392
23	SO_2	0,3488088	71	Steklite $\text{KAl}(\text{SO}_4)_2$	0,3501446
24	Agrellite $\text{NaCa}_2\text{Si}_4\text{O}_{10}\text{F}$	0,348823	72	Ferroindialite $(\text{Fe}^{2+}, \text{Mg})_2\text{Al}_4\text{Si}_5\text{O}_{18}$	0,350257
25	Sobolevskite PdBi	0,3488474	73	Yoshiokaite $\text{Ca}_{1-x}(\text{Al,Si})_2\text{O}_4$	0,3502706
26	Imandrite $\text{Na}_{12}\text{Ca}_3\text{Fe}^{3+}_2\text{Si}_{12}\text{O}_{36}$	0,3489272	74	Kalsilite Megakalsilite Kaliophilite KAlSiO_4	0,350283
27	Zemkorite Nyerereite $\text{Na}_2\text{Ca}(\text{CO}_3)_2$	0,3489323	75	Monticellite $\text{CaMg}(\text{SiO}_4)$	0,3502845
28	Magnesio-ferri-fluoro-hornblende $\text{Ca}_2(\text{Mg}_4\text{Fe}^{3+})(\text{Si}_7\text{Al})\text{O}_{22}\text{F}_2$	0,3489334	76	Melonite NiTe_2	0,35029
29	Meionite $\text{Ca}_4\text{Al}_6\text{Si}_6\text{O}_{24}(\text{CO}_3)$	0,3489899	77	Nefedovite $\text{Na}_5\text{Ca}_4(\text{PO}_4)_4\text{F}$	0,3502924
30	Krashennikovite $\text{KNa}_2\text{CaMg}(\text{SO}_4)_3\text{F}$	0,3490217	78	Kryachkoite $(\text{Al,Cu})_6(\text{Fe,Cu})$	0,3503789
31	Yarrowite Cu_9S_8	0,3490562	79	Potassic-fluoro-richterite $\text{K}(\text{NaCa})\text{Mg}_5\text{Si}_8\text{O}_{22}\text{F}_2$	0,3504017
32	Petalite $\text{LiAlSi}_4\text{O}_{10}$	0,3490618	80	Seinajokite FeSb_2	0,3504132
33	Calvertite $\text{Cu}_5\text{Ge}_{0,5}\text{S}_4$	0,3491036	81	Langbeinite $\text{K}_2\text{Mg}_2(\text{SO}_4)_3$	0,3504271
34	Fluoro-pedrizite $\text{NaLi}_2(\text{Mg}_2\text{Al}_2\text{Li})\text{Si}_8\text{O}_{22}\text{F}_2$	0,349223	82	Fluorluanshiweite $\text{KLiAl}_{1,5}0,5(\text{Si}_{3,5}\text{Al}_{0,5})\text{O}_{10}\text{F}_2$	0,35052
35	Chrysoberyl BeAl_2O_4	0,3492248	83	Thermessaitite $\text{K}_2\text{AlF}_3(\text{SO}_4)$	0,3505294
36	Covellite CuS	0,3492902	84	Lomonosovite $\text{Na}_6\text{Na}_2\text{Ti}_2\text{Na}_2\text{Ti}_2(\text{Si}_2\text{O}_7)_2(\text{PO}_4)_2\text{O}_4$	0,3505653
37	Weissite Cu_{2-x}Te	0,3492923	85	Krotite Dmitryivanovite CaAl_2O_4	0,3505849
38	Czocharalskiite $\text{Na}_4\text{Ca}_3\text{Mg}(\text{PO}_4)_4$	0,3493258	86	Patynite $\text{NaKCa}_4[\text{Si}_9\text{O}_{23}]$	0,3505915
39	Kazakovite $\text{Na}_6\text{Mn}^{2+}\text{TiSi}_6\text{O}_{18}$	0,3493559	87	Colusite $\text{Cu}_{13}\text{VAS}_3\text{S}_{16}$	0,3506039
40	Trattnerite $\text{Fe}^{3+}_2(\text{Mg}_3\text{Si}_{12})\text{O}_{30}$	0,3494061	88	Lautite CuAsS	0,3506146
41	Krinovite $\text{Na}_4[\text{Mg}_8\text{Cr}^{3+}_4]\text{O}_4[\text{Si}_{12}\text{O}_{36}]$	0,3494111	89	Osumilite $\text{KFe}_2(\text{Al}_5\text{Si}_{10})\text{O}_{30}$	0,350663
42	Renierite $(\text{Cu}^{1+}, \text{Zn})_{11}\text{Fe}_4(\text{Ge}^{4+}, \text{As}^{5+})_2\text{S}_{16}$	0,3494157	90	Sphalerite Wurtzite ZnS	0,3506719
43	Chukochenite LiAl_5O_8	0,3494327	91	Tennantite-(Fe) $\text{Cu}_6(\text{Cu}_4\text{Fe}_2)\text{As}_4\text{S}_{13}$	0,3507475
44	Naquite FeSi	0,349443	92	Qingheite $\text{Na}_2\text{MnMgAl}(\text{PO}_4)_3$	0,3507684
45	Germanite $\text{Cu}_{13}\text{Fe}_2\text{Ge}_2\text{S}_{16}$	0,3495708	93	Kawazulite $\text{Bi}_2\text{Te}_2\text{Se}$	0,3508477
46	Proxidecagonite $\text{Al}_{34}\text{Ni}_9\text{Fe}_2$	0,3495939	94	Argentopentlandite $\text{Ag}(\text{Fe,Ni})_8\text{S}_8$	0,3509086
47	Isokite $\text{CaMg}(\text{PO}_4)\text{F}$	0,3496007	95	Jervisite $\text{NaSc}^{3+}\text{Si}_2\text{O}_6$	0,3509718

Таблица 14. Минералы седьмого пакета (кубоид 7)

Table 14. Minerals of the seventh packet (cuboid 7)

Пози- ция	Минерал	I_{av}	Пози- ция	Минерал	I_{av}
0	—	—	48	Fluormayenite $\text{Ca}_{12}\text{Al}_{14}\text{O}_{32}[4\text{F}_2]$	0,3529544
1	Alumoakermanite $(\text{Ca,Na})_2(\text{Al,Mg,Fe}^{2+})(\text{Si}_2\text{O}_7)$	0,3509862	49	Emeleusite $\text{Na}_2\text{LiFe}^{3+}\text{Si}_6\text{O}_{15}$	0,3529808
2	Zincobriartite $\text{Cu}_2(\text{Zn,Fe})(\text{Ge,Ga})\text{S}_4$	0,3510241	50	Denisovite $\text{KCa}_2\text{Si}_3\text{O}_8\text{F}$	0,3531319
3	Qingheite-(Fe ²⁺) $\text{Na}_2\text{Fe}^{2+}\text{MgAl}(\text{PO}_4)_3$	0,3510383	51	Magnesiohögbonite-6N12S $\text{Mg}_5\text{Al}_{11}\text{TiO}_{23}(\text{OH})$	0,3531361
4	Carobbiite KF	0,3511233	52	Chlormayenite $\text{Ca}_{12}\text{Al}_{14}\text{O}_{32}[4\text{Cl}_2]$	0,3534175
5	Cryolithionite $\text{Na}_3\text{Al}_2(\text{LiF}_4)_3$	0,3512044	53	Sekaninaite $\text{Fe}^{2+}_2\text{Al}_4\text{Si}_5\text{O}_{18}$	0,3534603
6	Richardsite $\text{Zn}_2\text{CuGaS}_4$	0,3512151	54	Altisite $\text{Na}_3\text{K}_6\text{Ti}_2\text{Al}_2\text{Si}_8\text{O}_{26}\text{Cl}_3$	0,3535319



7	Tennantite-(Cu) $\text{Cu}_6(\text{Cu}_4\text{Cu}_2)\text{As}_4\text{S}_{13}$	0,3512241	55	Fluor-buergerite $\text{NaFe}^{3+}_3\text{Al}_6(\text{Si}_6\text{O}_{18})(\text{BO}_3)_3\text{O}_3\text{F}$	0,3540141
8	Pigeonite $(\text{Mg}, \text{Fe}, \text{Ca})_2\text{Si}_2\text{O}_6$	0,3512317	56	Adrianite $\text{Ca}_{12}(\text{Al}_4\text{Mg}_3\text{Si}_7)\text{O}_{32}\text{Cl}_6$	0,3540311
9	Fluorotetraferriphlogopite $\text{KMg}_3\text{Fe}^{3+}\text{Si}_3\text{O}_{10}\text{F}_2$	0,3512731	57	Wadalite $\text{Ca}_6\text{Al}_5\text{Si}_2\text{O}_{16}\text{Cl}_3$	0,3540384
10	Decagonite $\text{Al}_{71}\text{Ni}_{24}\text{Fe}_5$	0,3512731	58	Fleetite $\text{Cu}_2\text{RhIrSb}_2$	0,3540802
11	Fluorite CaF_2	0,351302	59	Merwinite $\text{Ca}_3\text{Mg}(\text{SiO}_4)_2$	0,3541457
12	Belomarinaite $\text{KNa}(\text{SO}_4)$	0,3513045	60	Ishiharaite $(\text{Cu}, \text{Ga}, \text{Fe}, \text{In}, \text{Zn})\text{S}$	0,3541648
13	Umbrianite $\text{K}_7\text{Na}_2\text{Ca}_2[\text{Al}_3\text{Si}_{10}\text{O}_{29}]\text{F}_2\text{Cl}_2$	0,3513081	61	Manaksite $\text{KNaMn}^{2+}\text{Si}_4\text{O}_{10}$	0,3541739
14	Delhayelite $\text{K}_7\text{Na}_3\text{Ca}_5\text{Al}_2\text{Si}_{14}\text{O}_{38}\text{F}_4\text{Cl}_2$	0,3513082	62	Wollastonite Pseudowollastonite Davemaoite CaSiO_3 Breyite $\text{Ca}_3\text{Si}_3\text{O}_9$	0,3542086
15	Tennantite-(Zn) $\text{Cu}_6(\text{Cu}_4\text{Zn}_2)\text{As}_4\text{S}_{13}$	0,3513753	63	Cuprostibite $\text{Cu}_2(\text{Sb}, \text{Ti})$	0,3542087
16	Phenakite $\text{Be}_2(\text{SiO}_4)$	0,3513813	64	Zirsinalite $\text{Na}_6\text{CaZrSi}_6\text{O}_{18}$	0,3542251
17	Zabuyelite $\text{Li}_2(\text{CO}_3)$	0,3513992	65	Coldwellite $\text{Pd}_3\text{Ag}_2\text{S}$	0,3542421
18	Buchwaldite $\text{NaCa}(\text{PO}_4)$	0,351431	66	Shuvalovite $\text{K}_2(\text{Ca}_2\text{Na})(\text{SO}_4)_3\text{F}$	0,3543002
19	Breithauptite NiSb	0,3515229	67	Aegirine-augite $(\text{Ca}, \text{Na})(\text{Fe}^{3+}, \text{Mg}, \text{Fe}^{2+})\text{Si}_2\text{O}_6$	0,3543325
20	Vavrinite Ni_2SbTe_2	0,3515679	68	Kurchatovite Clinokurchatovite CaMgB_2O_5	0,3543432
21	Ye'elimite $\text{Ca}_4\text{Al}_6\text{O}_{12}(\text{SO}_4)$	0,3515846	69	Natalyite $\text{NaV}^{3+}\text{Si}_2\text{O}_6$	0,3543475
22	Grossular $\text{Ca}_3\text{Al}_2(\text{SiO}_4)_3$	0,3515881	70	Odintsovite $\text{K}_2\text{Na}_4\text{Ca}_3\text{Ti}_2\text{Be}_4\text{Si}_{12}\text{O}_{38}$	0,3543614
23	Butianite Ni_6SnS_2	0,3515946	71	Fenaksite $\text{KNaFe}^{2+}\text{Si}_4\text{O}_{10}$	0,3544734
24	Luzonite Enargite Cu_3AsS_4	0,3517467	72	Oxyphlogopite $\text{K}(\text{Mg}, \text{Ti}, \text{Fe})_3[(\text{Si}, \text{Al})_4\text{O}_{10}](\text{O}, \text{F})_2$	0,3545979
25	Gallite CuGaS_2	0,3517481	73	Panethite $(\text{Na}, \text{Ca}, \text{K})_{1-x}$ $(\text{Mg}, \text{Fe}^{2+}, \text{Mn})\text{PO}_4$	0,3546299
26	Magnesioheptahydrite $\text{KNa}_2\text{Li}(\text{Mg}, \text{Fe})_2\text{Ti}_2\text{Si}_8\text{O}_{24}$	0,35176	74	Chvilevaite $\text{Na}(\text{Cu}, \text{Fe}, \text{Zn})_2\text{S}_2$	0,3546432
27	Danburite $\text{CaB}_2\text{Si}_2\text{O}_8$	0,3518767	75	Aguilarite Ag_4SeS	0,3546558
28	Akermanite $\text{Ca}_2\text{MgSi}_2\text{O}_7$	0,3519694	76	Knorringite $\text{Mg}_3\text{Cr}_2(\text{SiO}_4)_3$	0,3546746
29	Leucophanite $\text{NaCaBeSi}_2\text{O}_6\text{F}$	0,3519739	77	Niter $\text{K}(\text{NO}_3)$	0,3547166
30	Davanite $\text{K}_2\text{TiSi}_6\text{O}_{15}$	0,3520354	78	Aphthitalite $\text{K}_3\text{Na}(\text{SO}_4)_2$	0,35473
31	Watanabeite $\text{Cu}_4(\text{As}, \text{Sb})_2\text{S}_5$	0,3520605	79	Amblygonite $\text{LiAl}(\text{PO}_4)\text{F}$	0,3549278
32	Gehlenite $\text{Ca}_2\text{Al}(\text{SiAl})\text{O}_7$	0,3521202	80	Kosmochlor $\text{NaCr}^{3+}\text{Si}_2\text{O}_6$	0,3549408
33	Shortite $\text{Na}_2\text{Ca}_2(\text{CO}_3)_3$	0,3521223	81	Merrillite $\text{Ca}_9\text{NaMg}(\text{PO}_4)_7$	0,3550281
34	Levanite $\text{KCa}_3\text{Al}_2(\text{SiO}_4)(\text{Si}_2\text{O}_7)(\text{PO}_4)$	0,3522928	82	Mangani-dellaventurite $\text{NaNa}_2(\text{MgMn}^{3+}2\text{Ti}^{4+}\text{Li})\text{Si}_8\text{O}_{22}\text{O}_2$	0,3550692
35	Lisitsynite KBSi_2O_6	0,3522992	83	Anhydrite $\text{Ca}(\text{SO}_4)$	0,3551348
36	Spodumene Virgilite $\text{LiAlSi}_2\text{O}_6$	0,3523353	84	Mawsonite $\text{Cu}_6\text{Fe}_2\text{SnS}_8$	0,3552004
37	Natisite Parantite $\text{Na}_2\text{TiO}(\text{SiO}_4)$	0,3523728	85	Polythionite $\text{KLi}_2\text{AlSi}_4\text{O}_{10}\text{F}_2$	0,3553286
38	Nowackiite $\text{Cu}_6\text{Zn}_3\text{As}_4\text{S}_{12}$	0,3524013	86	Cuspidine $\text{Ca}_8(\text{Si}_2\text{O}_7)_2\text{F}_4$	0,3553525
39	Frohbergite FeTe_2	0,3524418	87	Lorenzenite $\text{Na}_2\text{Ti}_2\text{O}_3(\text{Si}_2\text{O}_6)$	0,3553568
40	Sobolevite $\text{Na}_6(\text{Na}_2\text{Ca})(\text{NaCaMn})\text{Na}_2\text{Ti}_2\text{Na}_2$ $(\text{TiMn})(\text{Si}_2\text{O}_7)_2(\text{PO}_4)_4\text{O}_2(\text{OF})\text{F}_2$	0,3524671	88	Stibiocolusite $\text{Cu}_{13}\text{V}(\text{Sb}, \text{Sn}, \text{As})_3\text{S}_{16}$	0,3553603
41	Johachidolite CaAlB_3O_7	0,3525868	89	Berezanskite $\text{KTi}_2\text{Li}_3\text{Si}_{12}\text{O}_{30}$	0,3553771
42	Anhydrokainite $\text{KMg}(\text{SO}_4)\text{Cl}$	0,3527387	90	Tuhualite $\text{NaFe}^{2+}\text{Fe}^{3+}\text{Si}_6\text{O}_{15}$	0,3554515
43	Avogadrite KBF_4	0,3527685	91	Ominelite $\text{Fe}^{2+}\text{Al}_3\text{O}_2(\text{BO}_3)(\text{SiO}_4)$	0,3555144
44	Vinciennite $\text{Cu}_{10}\text{Fe}_4\text{SnAsS}_{16}$	0,3527689	92	Götzenite $\text{Ca}_4\text{NaCa}_2\text{Ti}(\text{Si}_2\text{O}_7)_2(\text{OF})\text{F}_2$	0,3555158
45	Trilithionite $\text{KLi}_{1.5}\text{Al}_{10.5}(\text{Si}_3\text{Al})\text{O}_{10}\text{F}_2$	0,3527979	93	Icosahedrite $\text{Al}_{63}\text{Cu}_{24}\text{Fe}_{13}$	0,3556283
46	Rhönite $\text{Ca}_4[\text{Mg}_8\text{Fe}^{3+}_2\text{Ti}_2]\text{O}_4[\text{Si}_6\text{Al}_6\text{O}_{36}]$	0,3528201	94	Rouvilleite $\text{Na}_3\text{CaMn}^{2+}(\text{CO}_3)_3\text{F}$	0,355691
47	Sinnerite $\text{Cu}_6\text{As}_4\text{S}_9$	0,3528797	95	Eucryptite LiAlSiO_4	0,3557716



Таблица 15. Минералы восьмого пакета (кубоид 8)
Table 15. Minerals of the eighth packet (cuboid 8)

Пози- ция	Минерал	I_{av}	Пози- ция	Минерал	I_{av}
0	–	–	48	Hurlbutite $\text{CaBe}_2(\text{PO}_4)_2$	0,3578475
1	Roterbarite PdCuBiSe_3	0,3558199	49	Calciborite CaB_2O_4	0,3578499
2	Keplerite $\text{Ca}_9(\text{Ca}_{0.5} \text{ }_{0.5})\text{Mg}(\text{PO}_4)_7$	0,3558224	50	Moissanite SiC	0,3578598
3	Bredigite $\text{Ca}_7\text{Mg}(\text{SiO}_4)_4$	0,3558416	51	Anorpiment Orpiment As_2S_3	0,3578794
4	Colquiriite CaLiAlF_6	0,3558437	52	Wyllieite $\text{NaNaMn}(\text{Fe}^{2+}\text{Al})(\text{PO}_4)_3$	0,357991
5	Merrihueite $(\text{K},\text{Na})_2(\text{Fe}^{2+},\text{Mg})_5\text{Si}_{12}\text{O}_{30}$	0,3559373	53	Maghagendorfite $\text{Na}_2\text{MgFe}^{2+}\text{Fe}^{3+}(\text{PO}_4)_3$	0,3580225
6	Cervelleite Ag_4TeS	0,3560236	54	Thortveitite $\text{Sc}_2\text{Si}_2\text{O}_7$	0,3580381
7	Nakkaalaaqite $\text{K}_2[\text{Na}_3\text{Ca}]\text{LiCa}_2\text{Ti}_2\text{B}$ $\text{e}_4\text{Si}_{12}\text{O}_{38}$	0,3560946	55	Alacranite As_8S_9	0,3580587
8	Arsenotučekite $\text{Ni}_{18}\text{Sb}_3\text{AsS}_{16}$	0,356153	56	Jasmundite $\text{Ca}_{11}\text{O}_2(\text{SiO}_4)_4\text{S}$	0,3581031
9	Rankinite $\text{Ca}_3\text{Si}_2\text{O}_7$ Kilchoanite $\text{Ca}_6(\text{SiO}_4)(\text{Si}_3\text{O}_{10})$	0,3561702	57	Uzonite As_4S_5	0,3581167
10	Fluorellestadite $\text{Ca}_5(\text{SiO}_4)_{1.5}(\text{SO}_4)_{1.5}\text{F}$	0,3562838	58	Ferro-fluoro-pedrizite $\text{NaLi}_2(\text{Fe}^{2+}_2\text{Al}_2\text{Li})\text{Si}_8\text{O}_{22}\text{F}_2$	0,3581469
11	Calciolangbeinite $\text{K}_2\text{Ca}_2(\text{SO}_4)_3$	0,3562981	59	Ferrisanidine $\text{K}(\text{Fe}^{3+}\text{Si}_3\text{O}_8)$	0,3581755
12	Oxo-magnesio-hastingsite $\text{NaCa}_2(\text{Mg}_2\text{Fe}^{3+}_3)(\text{Si}_6\text{Al}_2)\text{O}_{22}\text{O}_2$	0,3563066	60	Telluronevskite Bi_3TeSe_2	0,3581985
13	Davisite CaScAlSiO_6	0,3563485	61	Cupalite CuAl Stolperite AlCu	0,3582589
14	Kumtyubeite $\text{Ca}_5(\text{SiO}_4)_2\text{F}_2$	0,3563962	62	Paqueite $\text{Ca}_3\text{TiSi}_2(\text{Al},\text{Ti},\text{Si})_3\text{O}_{14}$	0,3583418
15	Rondorfite $\text{Ca}_8\text{Mg}(\text{SiO}_4)_4\text{Cl}_2$	0,3564491	63	Brenkite $\text{Ca}_2(\text{CO}_3)\text{F}_2$	0,3584807
16	Pavlovskyite $\text{Ca}_8(\text{SiO}_4)_2(\text{Si}_3\text{O}_{10})$	0,3564567	64	Dellagiustaitite $\text{V}^{2+}\text{Al}_2\text{O}_4$	0,358517
17	Florensovite $\text{Cu}(\text{Cr}_{1.5}\text{Sb}_{0.5})\text{S}_4$	0,3565103	65	Udinaite $\text{NaMg}_4(\text{VO}_4)_3$	0,3585541
18	Bohdanowiczite AgBiSe_2	0,3565121	66	Gugiaite $\text{Ca}_2\text{BeSi}_2\text{O}_7$	0,35857
19	Fluorapatite $\text{Ca}_5(\text{PO}_4)_3\text{F}$	0,3565553	67	Matyhyte $\text{Ca}_9(\text{Ca}_{0.5} \text{ }_{0.5})\text{Fe}^{2+}(\text{PO}_4)_7$	0,358575
20	Titanoholtite $(\text{Ti}_{0.75} \text{ }_{0.25})\text{Al}_6\text{BSi}_3\text{O}_{18}$	0,3565557	68	Pretulite $\text{Sc}(\text{PO}_4)$	0,3585752
21	Dimorphite As_4S_3	0,3565588	69	Galuskinite $\text{Ca}_7(\text{SiO}_4)_3(\text{CO}_3)$	0,3586057
22	Sugilite $\text{KNa}_2\text{Fe}^{3+}_2(\text{Li}_3\text{Si}_{12})\text{O}_{30}$	0,3565723	70	Tilleyite $\text{Ca}_5\text{Si}_2\text{O}_7(\text{CO}_3)_2$	0,3586156
23	Namansilite $\text{NaMn}^{3+}\text{Si}_2\text{O}_6$	0,3565805	71	Herderite $\text{CaBe}(\text{PO}_4)\text{F}$	0,3587138
24	Fluorchegemite $\text{Ca}_7(\text{SiO}_4)_3\text{F}_2$	0,3566902	72	Tucekite $\text{Ni}_9\text{Sb}_2\text{S}_8$	0,3587214
25	Kanoite $\text{MnMgSi}_2\text{O}_6$	0,3566935	73	Okayamalite $\text{Ca}_2\text{B}_2\text{SiO}_7$	0,3587592
26	Rusinovite $\text{Ca}_{10}(\text{Si}_2\text{O}_7)_3\text{Cl}_2$	0,356697	74	Calcite Vaterite Aragonite $\text{Ca}(\text{CO}_3)$	0,3587623
27	Dalnégorskite $\text{Ca}_5\text{Mn}(\text{Si}_3\text{O}_9)_2$	0,3567386	75	Baratovite $\text{KLi}_3\text{Ca}_7\text{Ti}_2(\text{SiO}_3)_{12}\text{F}_2$	0,3587807
28	Edgrewite $\text{Ca}_9(\text{SiO}_4)_4\text{F}_2$	0,3568486	76	Hatruite Ca_3SiO_5	0,3587843
29	Flamite $\text{Ca}_{8-x}(\text{Na},\text{K})_x(\text{SiO}_4)_{4-x}(\text{PO}_4)_x$	0,3568664	77	Saranchinaite $\text{Na}_2\text{Cu}(\text{SO}_4)_2$	0,3588537
30	Tuite $\text{Ca}_3(\text{PO}_4)_2$	0,3568778	78	Spurrite $\text{Ca}_5(\text{SiO}_4)_2(\text{CO}_3)$	0,3589489
31	Ternesite $\text{Ca}_5(\text{SiO}_4)_2(\text{SO}_4)$	0,3569012	79	Tsnigriite $\text{Ag}_9\text{SbTe}_3\text{S}_3$	0,3591139
32	Aegirine $\text{NaFe}^{3+}\text{Si}_2\text{O}_6$	0,3570787	80	Warkite $\text{Ca}_2\text{Sc}_6\text{Al}_6\text{O}_{20}$	0,3592244
33	Silicocarnotite $\text{Ca}_5[(\text{PO}_4)(\text{SiO}_4)](\text{PO}_4)$ Tsangpoite $\text{Ca}_5(\text{PO}_4)_2(\text{SiO}_4)$	0,3570855	81	Rosemaryite $\text{NaMn}^{2+}(\text{Fe}^{3+}\text{Al})(\text{PO}_4)_3$	0,3592704
34	Khatyrkite CuAl_2	0,3571105	82	Neptunite $\text{KNa}_2\text{LiFe}^{2+}_2\text{Ti}_2\text{Si}_8\text{O}_{24}$	0,3593333
35	Nagelschmidtite $\text{Ca}_7(\text{SiO}_4)_2(\text{PO}_4)_2$	0,3571752	83	Burnettite CaVAISiO_6	0,3593559
36	Chlorellestadite $\text{Ca}_5(\text{SiO}_4)_{1.5}(\text{SO}_4)_{1.5}\text{Cl}$	0,3571856	84	Ferro-ferri-obertiite $\text{NaNa}_2(\text{Fe}^{2+}_3\text{Fe}^{3+}\text{Ti})\text{Si}_8\text{O}_{22}\text{O}_2$	0,3594081
37	Goryainovite $\text{Ca}_2(\text{PO}_4)\text{Cl}$	0,3573693	85	Eckermannite $\text{NaNa}_2(\text{Mg}_4\text{Al})\text{Si}_8\text{O}_{22}(\text{OH})_2$	0,3594784
38	Calcio-olivine Larnite $\text{Ca}_2(\text{SiO}_4)$	0,3573881	86	Nekrasovite $\text{Cu}_{13}\text{VSn}_3\text{S}_{16}$	0,3595218
39	Chlorapatite $\text{Ca}_5(\text{PO}_4)_3\text{Cl}$	0,3574078	87	Oxo-mangani-leakeite $\text{NaNa}_2(\text{Mn}^{3+}_4\text{Li})\text{Si}_8\text{O}_{22}\text{O}_2$	0,359684



40	Arcanite $K_2(SO_4)$	0,3575114	88	Sudovikovite $PtSe_2$	0,3598099
41	Nabimusaite $KCa_{12}(SiO_4)_4(SO_4)_2O_2F$	0,3575498	89	Hutcheonite $Ca_3Ti_2(SiAl_2)O_{12}$	0,3598233
42	Zhanghuifenite $Na_3Mn^{2+}_4Mg_2Al(PO_4)_6$	0,3576615	90	Watatsumiite $LiNa_2KMn_2V_2Si_8O_{24}$	0,3599183
43	Stannoidite $Cu_8(Fe,Zn)_3Sn_2S_{12}$	0,3577296	91	Cumingtonite $Mg_2Mg_5Si_8O_{22}(OH)_2$	0,3599719
44	Grossmanite $Ca(Ti^{3+}, Mg, Ti^{4+})AlSiO_6$	0,3578051	92	Johnsomervilleite $Na_{10}Ca_6Mg_{18}Fe^{2+}_{25}(PO_4)_{36}$	0,3599956
45	Ferromerrillite $Ca_9NaFe^{2+}(PO_4)_7$	0,3578066	93	Rubinite $Ca_3Ti^{3+}_2Si_3O_{12}$	0,3600018
46	Realgar AsS Bonazziite Pararealgar As_4S_4	0,3578257	94	Gedrite $Mg_2(Mg_3Al_2)(Si_6Al_2)O_{22}(OH)_2$	0,3601947
47	Oulankaite $Pd_5Cu_4SnTe_2S_2$	0,357838	95	Glaucophane $Na_2(Mg_3Al_2)Si_8O_{22}(OH)_2$	0,3602481

При таких условиях миграция химических элементов возможна в любой из объемов модели как в пределах кубоида, так и в другой кубоид. В последнем случае возможно существенное увеличение мигрирующих масс за счет внешнего источника. Остается открытым вопрос о количественных различиях при миграции в случае смежности элементарных объемов по грани или ребру, что соответствует контактам объемов «грань к грани», «ребро к ребру» и «вершина к вершине».

Миграция химических элементов может быть связана с пространственными объемами криптона и технеция, а также ксенона. Эти объемы предлагается называть соответственно криптоновым и ксеноновым туннелями. Существование ксенонового туннеля 7-й пространственной группы углерода, возможно, проявляется в эксплозивных процессах при образовании алмазов.

Остановимся на этом показательном примере. Основной изоморфной примесью в природных алмазах является азот, в меньшей мере водород, никель, кремний, редко бор [12–14]. Если упрощенно рассматривать изоморфизм только с точки зрения близости расположения химических элементов в объемной модели, можно отметить, что большинство из них, за исключением никеля и кремния, располагаются в смежных относительно углерода пространственных группах. Это, согласно принятым выше условиям миграции, обеспечивает их естественное перемещение в пространственную группу углерода. Никель и кремний с принятых позиций могут мигрировать в эту группу по газовым туннелям миграции.

Показательны также обычно встречающиеся в алмазах примеси газов He, Ar, Ne, Xe,

H_2 , N_2 , CO, CO_2 , H_2O , CH_4 [15]. Если не брать во внимание последние три примеси из перечисленных, то все они также располагаются в смежных относительно углерода пространственных группах. При этом для последних двух еще нет информации по их позиции в кубоиде, а CO_2 располагается в 14-й пространственной группе, смежной относительно 11-й пространственной группы с CO. Показательно также отсутствие среди примесей криптона, который располагается в 5-й пространственной группе, относительно «изолированной» от 7-й пространственной группы с углеродом в сравнении с рассмотренными пространственными группами.

Вероятно, правильнее говорить о ксеноно-радоновом туннеле, в котором газы, очевидно, находятся под давлением. Этот туннель окружен газами водородного туннеля, которые в пространственном отношении перечисляем от гелия до неона: гелий, водород, вакансия, азот, кислород, фтор, неон. Позиции этих газов можно учитывать в структуре ксеноно-радонового туннеля.

Из состава первых восьми пакетов (кубоидов) были рассмотрены некоторые распространенные минералы с определением возможных путей миграции химических элементов для их образования (табл. 16).

Позиция минералов указана в виде номера пространственной группы, индекса его «материнского» химического элемента и позиции в группе. Химические элементы в таблице приведены в порядке их перечисления в формуле минералов. Восклицательным знаком указано начало миграции по криптоновому туннелю. Направление движения показано слева направо от объемного положения



Таблица 16. Миграционные пути химических элементов при образовании минералов
Table 16. Migration paths of chemical elements under mineral formation

Минерал и его позиция в группе	Химическая формула	Химический элемент из состава минерала	
		1	2
Sylvite 9Cr2	KCl	4K2-3-2-(1)-8-9Cr2 t4K2-1-8-(9)-t9Cr2	2Cl2-(1)-8-9Cr2 t2Cl2-(1)-8-t!5-11-10-9Cr2
Halite 13Os5	NaCl	12Na1-13Os5 t12Na1-t9O1-10-11-13Os5	2Cl2-1-8-(9)-10-11-13Os5 t2Cl2-3-(4)-t13Os5
Corundum 13Os5	Al ₂ O ₃	14Al1-13Os5 t14Al1-t(3)-2-(1)-8-(9)-10-11-13Os5	9O1-10-11-13Os5 t9O1-t13Os5
Pyrite 13U6	FeS ₂	11Fe2-13U6 t11Fe2-10-(9)-8-(1)-2-3-t13U6 t11Fe2-10-9-t13U6	1S2-8-(9)-10-11-13U6 t1S2-t13U6 t1S2-t!5-12-13U6
Quartz 9O1	SiO ₂	15Si1-9O1 t15Si1-t(2)-(1)-8-9O1	9O1-9O1 t9O1-t!12-11-10-9O1
Pyrrhotite 6Sc2	Fe ₇ S ₈	11Fe2-6Sc2 t11Fe2-10-9-t!12-(5)-6Sc2	1S2-2-(3)-6Sc2 1S2-8-(9)-10-(11)-6Sc2 t1S2-t!5- 6Sc2
Sphalerite 11Th6	ZnS	15Zn2-(10)-11Th6 t15Zn2-9-t!12-11Th6	1S2-8-(9)-10-11Th6 t1S2-8-t!5-(12)-11Th6
Fluorite 12Na1	CaF ₂	5Ca2-12Na1 t5Ca2-t8-(9)-10-11-12Na1	10F1-11-12Na1 t10F1-9-t!12Na1

химического элемента из состава минерала до позиции данного минерала (его материнского химического элемента). Первое t перед позицией мигрирующего химического элемента указывает на трансляционную миграцию из смежного кубоида, второе t определяет позицию входа миграционного потока в рассматриваемый кубоид.

Объем технеция принимаем как проникаемый и сопоставимый по этому свойству с объемами газов и включаем его в состав криптонового туннеля. Это предполагается в связи с тем, что позиция кварца 9O1 в модели дает возможности привноса кислорода из смежных кубов по кратчайшему пути только с учетом криптонового туннеля с объемом технеция. По криптоновому туннелю с объемом технеция «улучшаются» возможности миграции элементов 11-й пространственной группы (Fe, Mo, Se, W и Th). При принятых условиях миграции для формирования распространенных минералов оказываются возможными короткие миграционные пути, в том числе при миграции из смежных кубоидов.

Обсуждение объемной модели. Объемные позиции в рассмотренной модели могут занимать химические элементы, минералы и горные породы. При этом любая горная порода по позиции в модели соответствует опреде-

ленному минералу, по названию которого она и должна получить свое новое название. Предстоит выяснить закономерности совмещения в пространстве минералов (горных пород) разных пакетов, в данной работе они не рассматриваются, как не рассматриваются и причины миграции химических элементов.

Объемная модель обладает свойством хиральности. По предварительной информации в земной коре реализован только разворот пространственных групп вправо после 4-й пространственной группы в направлении 5-й, а не влево. Возможность существования в земной коре левого варианта кубоида требует проверки. Такая проверка может быть проведена на нескольких структурных уровнях.

На микроуровне возможно наблюдение взаимного расположения минералов из первых восьми пакетов, но при этом плоскости шлифов должны быть ориентированы в пространстве без их зеркального отражения относительно исходного залегания. При отражении порядок следования зерен минералов может подтвердить проявление объемной модели, но без возможности ее спецификации как правой или левой. На уровне рудных тел и месторождений для различения типа модели уже возможно рассмотрение позиций минералов первых восьми пакетов. Например, уста-



новлены позиции в объемной модели для самородной меди, халькопирита, талнахита, борнита и кубанита.

Маркерами в объемных моделях могут быть вакансии, в качестве которых предполагаются вулканы, пещеры, карстовые депрессии, ядра диапировых складок и др. Информация об объемной модели может быть также получена при анализе взаимного расположения вулканов, угленосных отложений, известняков и доломитов. Вакансии могут быть выявлены и при анализе геофизических данных, например связанных с тепловыми потоками покмарков [16, 17].

По взаимному расположению некоторых месторождений сделана попытка определить тип модели как правый или левый. Правый тип объемной модели предположительно проявляется во взаимном расположении некоторых месторождений полезных ископаемых Норвегии и Швеции⁵. В Норвегии характерно взаимное расположение месторождений доломитов, известняков, кварцитов и нефелиновых сиенитов: 1019, доломит, Logavlen – 1044, известняк, Dalen – 1096, кварцит, Kragerø – 1069, нефелин (сиенит), Stjernøy (приведены номера позиций, полезные ископаемые и названия месторождений (локация)). Эти объекты можно связать с пространственными группами 7, 11, 9, 1. В Швеции в аналогичном аспекте предлагается рассмотреть месторождения кианита, полевого шпата и серебра: 1583, кианит, Halskoberg – 1563, полевой шпат, Riddarhyttan – 1605, серебро: металл, Ammeberg.

Аналитиком Е.А. Черной были обработаны результаты химических анализов анортозитов северо-востока штата Нью-Йорк [18]. Выяснено, что изученные анортозиты представляют собой разные породы пятого пакета. Пробы АА-164, АА-194 и АВМ-58 соотносятся с первыми позициями пакетов 10, 8 и 1 (из смежного кубоида) и указывают на правый тип объемной модели. Тем не менее встречаемость в природе объемных моделей правого и левого типа требует изучения, которое осложняется тем, что в элементарных объемах модели могут быть проявлены кубоиды меньшего размера, скорее всего, с фракталь-

ным характером взаимоотношений. Каждый элементарный объем может представлять из себя кубоид другого порядка.

Отдельного внимания заслуживает вакансия – возможный нулевой химический элемент, отсутствующий в Периодической таблице химических элементов Д.И. Менделеева. В дальнейшем расчетами показателя многомерной пропорциональности для 1-й пространственной группы может быть проверена возможность того, что нулевым химическим элементом является нейтронное вещество, как это предполагается в современной науке [18–21].

Заключение

Таким образом, на основании результатов проведенного исследования можно заключить, что горные породы и минералы по возрастанию ПМПВ химических элементов, входящих в их состав, располагаются в объемной модели аналогично химическим элементам, позиционированным по возрастанию атомных весов. Анализ системных свойств кубоида указывает на важное значение вертикальных пространственных групп химических элементов и их разделение на S- и G-типы.

Предполагается, что земную кору можно разделить на иерархически «вложенные» друг в друга кубоиды в сочетании с тем, что все пространство можно представить в виде кубоидов близкого размера. По результатам позиционирования 760 минералов в ходе проведенной работы сделана первая попытка представить кубоид во временном измерении. При этом удалось наметить важную роль газовых туннелей миграции химических элементов в земной коре.

Предложена новая парадигма геологических исследований, заключающаяся в позиционировании минералов и горных пород в объемной модели с возможностью определения путей миграции входящих в их состав химических элементов. Многомерная пропорциональность атомных масс, возможно, является более фундаментальной характеристикой минералов и горных пород, чем их химический состав.

⁵ Almanzar F., Baker M., Elias N., Guzman E. Mineral facilities of Europe: open-file report 2010–1257 [Электронный ресурс]. URL: <https://pubs.usgs.gov/of/2010/1257/> (10.11.2022).



Список источников

1. Labarca M. An element of atomic number zero? // *New Journal of Chemistry*. 2016. Vol. 40. Iss. 11. P. 9002–9006. <https://doi.org/10.1039/C6NJ02076C>.
2. Шило Н.А., Дринков А.В. Фенотипическая система атомов в развитие идей Д.И. Менделеева // *Вестник Северо-Восточного научного центра ДВО РАН*. 2007. № 1. С. 89–98.
3. Гусев Б.В., Сперанский А.А., Шалимов Л.Н., Волкова Ю.В. Матричное представление периодичности системы химических элементов // *Русский инженер*. 2018. № 4. С. 52–57.
4. Лабушев М.М., Лабушев Т.М. Объемная модель периодической системы химических элементов в геологическом аспекте // *Известия высших учебных заведений. Горный журнал*. 2020. № 1. С. 36–47. <https://doi.org/10.21440/0536-1028-2020-1-36-47>.
5. Лабушев М.М. О предельно возможном числе минералов, неорганических и органических химических соединений // *Журнал Сибирского федерального университета. Серия: Техника и технологии*. 2008. Т. 1. № 3. С. 221–233.
6. Labushev M.M., Khokhlov A.N. Relative dating and classification of minerals and rocks based on statistical calculations related to their potential energy index [Электронный ресурс]. URL: <https://arxiv.org/ftp/arxiv/papers/1212/1212.2628.pdf> (13.12.2022).
7. Лабушев М.М. От параметрического классифицирования минералов и горных пород к общему решению проблемы классифицирования вещества по химическому составу // *Вестник Новосибирского государственного университета. Серия: Информационные технологии*. 2017. Т. 15. № 2. С. 47–58.
8. Лабушев М.М. Бинарные массы земной коры и биосферы // *Известия Томского политехнического университета. Инжиниринг георесурсов*. 2018. Т. 329. № 1. С. 37–43.
9. Бажин В.Ю., Александрова Т.А., Котова Е.Л., Суслов А.П. Современный взгляд на аномалии в группах металлов Периодической системы Д.И. Менделеева // *Записки Горного института*. 2019. Т. 239. С. 520–527. <https://doi.org/10.31897/PMI.2019.5.520>.
10. Княжин С.Л., Коровкин В.В. «Странные» валентности химических элементов в минералах как показатель апейронного синтеза и транссинтеза // *Уральский геологический журнал*. 2006. № 4. С. 171–177.
11. Сироткин О.С., Сироткин Р.О. О границе применимости понятия «валентность» в рамках единой теории строения химических соединений и объединяющей их системы // *Вестник технологического университета*. 2018. Т. 21. № 6. С. 13–18.
12. Шацкий В.С., Надолинный В.А., Юрьева О.П., Рахманова М.И., Комаровских А.Ю. Особенности примесного состава алмазов из россыпей Северо-Востока Сибирского кратона // *Доклады Академии наук*. 2019. Т. 486. № 4. С. 466–468. <https://doi.org/10.31857/S0869-56524864466-468>.
13. Gaillou E., Post J.E., Rost D., Butler J.E. Boron in natural type IIb blue diamonds: chemical and spectroscopic measurements // *American Mineralogist*. 2012. Vol. 97. Iss. 1. P. 1–18. <https://doi.org/10.2138/am.2012.3925>.
14. The properties of natural and synthetic diamond / ed. J.E. Field. London: Academic Press, 1992. 710 p.
15. Третьякова Л.И., Люхин А.М. Примесные, дефектные центры и включения в природных алмазах – характеристики космогенно-импактно-метаморфогенно-метасоматической истории их генезиса // *Уральский геологический журнал*. 2017. № 3. С. 43–73.
16. Макаров Д.В., Холмогоров А.О., Шакиров Р.Б. Влияние покмарков на распространение низкочастотного звука в мелком море // *Подводные исследования и робототехника*. 2021. № 4. С. 60–71. https://doi.org/10.37102/1992-4429_2021_38_04_06.
17. Рыбак Е.Н., Ступина Л.В. Покмарки Черного моря // *Геологія і корисні копалини Світового океану*. 2019. Т. 15. № 2. С. 16–34. <https://doi.org/10.15407/gpimo.2019.01.016>.
18. Seifert K.E., Dymek R.F., Whitney P.R., Haskin L.A. Geochemistry of massif anorthosite and associated rocks, Adirondack Mountains, New York // *Geosphere*. 2010. Vol. 6. Iss. 6. P. 855–899. <https://doi.org/10.1130/GES00550.1>.
19. Золотов Ю.А. Периодический закон химических элементов: 150 лет развития // *Вестник Российской академии наук*. 2020. Т. 90. № 4. С. 305–311. <https://doi.org/10.31857/S0869587320040180>.
20. Саркисов Ю.С., Горленко Н.П. Развитие представлений о структуре таблицы химических элементов Д.И. Менделеева // *Вестник Томского государственного университета. Химия*. 2020. № 17. С. 69–73. <https://doi.org/10.17223/24135542/17/5>.
21. Stewart P.J. A century on from Dmitrii Mendeleev: tables and spirals, noble gases and Nobel prizes // *Foundations of Chemistry*. 2007. Vol. 9. P. 235–245. <https://doi.org/10.1007/s10698-007-9038-x>.

References

1. Labarca M. An element of atomic number zero? *New Journal of Chemistry*. 2016;40(11):9002-9006. <https://doi.org/10.1039/C6NJ02076C>.
2. Shilo N.A., Drinkov A.V. A phenotypic atomic system as extending the ideas of D.I. Mendeleev. *Vestnik Severo-Vostochnogo nauchnogo tsentra DVO RAN = Bulletin of the North-East Scientific Center, Russia Academy of Sciences Far East Branch*. 2007;1:89-98. (In Russ.).
3. Gusev B.V., Speranskiy A.A., Shalimov L.N., Volkova Y.V. Matrix representation of periodicity of the chemical elements system. *Russkii inzhener = Russian Engineer*. 2018;4:52-57. (In Russ.).
4. Labushev M.M., Labushev T.M. The periodic system of chemical elements solid model in the geological aspect. *Izvestiya vysshikh uchebnykh zavedenii. Gornyi zhurnal = Minerals and Mining Engineering*. 2020;1:36-47. (In Russ.).



<https://doi.org/10.21440/0536-1028-2020-1-36-47>.

5. Labushev M.M. About limit numbers of minerals, inorganic and organic chemical compounds. *Zhurnal Sibirskogo federal'nogo universiteta. Seriya: Tekhnika i tehnologii = Journal of Siberian Federal University. Engineering & Technologies*. 2008;1(3):221-233. (In Russ.).

6. Labushev M.M., Khokhlov A.N. Relative dating and classification of minerals and rocks based on statistical calculations related to their potential energy index. Available from: <https://arxiv.org/ftp/arxiv/papers/1212/1212.2628.pdf> [Accessed 13th December 2022].

7. Labushev M.M. From parametric classifying of minerals and rocks to general solution of the problem of chemical classifying of matters. *Vestnik Novosibirskogo gosudarstvennogo universiteta. Seriya: Informatsionnye tehnologii = Vestnik NSU. Series: Information Technologies*. 2017; 15(2):47-58. (In Russ.).

8. Labushev M.M. Binary masses of the earth crust and biosphere. *Izvestiya Tomskogo politekh-nicheskogo universiteta. Inzhiniring georesursov = Bulletin of the Tomsk Polytechnic University. Geo Assets Engineering*. 2018;329 (1):37-43. (In Russ.).

9. Bazhin V.Y., Aleksandrova T.A., Kotova E.L., Suslov A.P. A modern view of anomalies in the metal groups of the Periodic system of D.I. Mendeleev. *Zapiski Gornogo instituta = Journal of Mining Institute*. 2019;239:520-527. (In Russ.). <https://doi.org/10.31897/PMI.2019.5.520>.

10. Kniagin S.L., Korovkin V.V. The strange valency of the chemical elements in the minerals – how index apheironic synthesis and transsynthesis. *Ural'skii geologicheskii zhurnal = Uralian Geological Journal*. 2006;4:171-177. (In Russ.).

11. Sirotkin O.S., Sirotkin R.O. On the limits of the "valence" term applicability within the unified theory of the structure of chemical compounds and of the system unifying them. *Vestnik tekhnologicheskogo universiteta = Bulletin of the Technological University*. 2018;21(6):13-18. (In Russ.).

12. Shatsky V.S., Nadolnny V.A., Yuryeva O.P., Rakhmanova M.I., Komarovskikh A.Y. Features of the impurity composition of diamonds from placers of the northeastern Siberian craton. *Doklady Akademii nauk*. 2019;486(4):466-

468. (In Russ.). <https://doi.org/10.31857/S0869-56524864466-468>.

13. Gaillou E., Post J.E., Rost D., Butler J.E. Boron in natural type IIb blue diamonds: chemical and spectroscopic measurements. *American Mineralogist*. 2012;97(1):1-18. <https://doi.org/10.2138/am.2012.3925>.

14. Field J.E. The properties of natural and synthetic diamond. London: Academic Press; 1992. 710 p.

15. Tretiakova L.I., Lyukhin A.M. Impurity, defect centres and inclusions in diamonds are characteristics of cosmic-impact-metamorphic-metacomatic history of natural diamond genesis. *Ural'skii geologicheskii zhurnal = Uralian Geological Journal*. 2017;3:43-73. (In Russ.).

16. Makarov D.V., Kholmogorov A.O., Shakirov R.B. Influence of pockmarks on propagation of low-frequency sound in a shallow sea. *Podvodnye issledovaniya i robototekhnika = Underwater Investigation and Robotics*. 2021; 4:60-71. (In Russ.). https://doi.org/10.37102/1992-4429_2021_38_04_06.

17. Rybak E.N., Stupina L.V. Black Sea pockmarks. *Geologiya i poleznye iskopaemye Mirovogo okeana*. 2019;15(2):16-34. (In Russ.). <https://doi.org/10.15407/gpimo.2019.01.016>.

18. Seifert K.E., Dymek R.F., Whitney P.R., Haskin L.A. Geochemistry of massif anorthosite and associated rocks, Adirondack Mountains, New York. *Geosphere*. 2010; 6(6):855-899. <https://doi.org/10.1130/GES00550.1>.

19. Zolotov Y.A. Evolution of chemical analysis methods. *Vestnik Rossiiskoi akademii nauk*. 2020;90(4):305-311. (In Russ.). <https://doi.org/10.31857/S0869587320040180>.

20. Sarkisov Y.S., Gorlenko N.P. Development of ideas about the structure of the table of chemical elements D.I. Mendeleev. *Vestnik Tomskogo gosudarstvennogo universiteta. Khimiya = Tomsk State University Journal of Chemistry*. 2020;17:69-73. (In Russ.). <https://doi.org/10.17223/24135542/17/5>.

21. Stewart P.J. A century on from Dmitrii Mendeleev: tables and spirals, noble gases and Nobel prizes. *Foundations of Chemistry*. 2007;9:235-245. <https://doi.org/10.1007/s10698-007-9038-x>.

Информация об авторах / Information about the authors

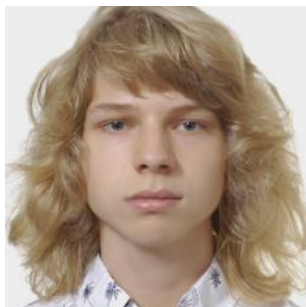


Лабушев Михаил Михайлович,

кандидат геолого-минералогических наук, доцент,
доцент кафедры геологии месторождений и методики разведки,
Институт горного дела, геологии и геотехнологий,
Сибирский федеральный университет,
г. Красноярск, Россия,
✉ mlabushev@yandex.ru

Mikhail M. Labushev,

Cand. Sci. (Geol. & Mineral.), Associate Professor,
Associate Professor of the Department of Field Geology and Exploration Methods,
School of Mining, Geology and Geotechnology,
Siberian Federal University,
Krasnoyarsk, Russia,
✉ mlabushev@yandex.ru



Лабушев Тимофей Михайлович,
студент,
Национальный исследовательский университет ИТМО,
г. Санкт-Петербург, Россия,
tim.labushev@gmail.com
Timofei M. Labushev,
Student,
ITMO University,
Saint Petersburg, Russia,
tim.labushev@gmail.com



Хохлов Александр Николаевич,
главный геолог,
ООО «Геоэкономика»,
г. Красноярск, Россия,
hohlow@krasfond.ru
Aleksandr N. Khokhlov,
Chief Geologist,
Goeconomics LLC,
Krasnoyarsk, Russia,
hohlow@krasfond.ru

Вклад авторов / Contribution of the authors

Лабушев М.М. принимал участие в написании подразделов «Описание кубоида химических элементов, минералов и горных пород», «Системные свойства кубоида в свете свойств химических элементов», «Позиционирование минералов в объемной модели», а также написал подразделы «Миграция химических элементов в объемной модели», «Обсуждение объемной модели». Лабушев Т.М. принимал участие в написании подраздела «Позиционирование минералов в объемной модели». Хохлов А.Н. принимал участие в написании подразделов «Описание кубоида химических элементов, минералов и горных пород», «Системные свойства кубоида в свете свойств химических элементов».

Labushev M.M. contributed to the subsections "Description of the cuboid of chemical elements, minerals and rocks", "System properties of the cuboid in terms of chemical element properties", "Mineral positioning in a three-dimensional model", and also developed the subsections "Migration of chemical elements in a three-dimensional model", "3D Model Discussion". Labushev T.M. contributed to the subsection "Positioning of minerals in a three-dimensional model". Khokhlov A.N. took part in working out the subsections "Description of the cuboid of chemical elements, minerals and rocks", "System properties of the cuboid in terms of chemical element properties".

Конфликт интересов / Conflict of interests

Авторы заявляют об отсутствии конфликта интересов.
The authors declare no conflicts of interests.

Все авторы прочитали и одобрили окончательный вариант рукописи.
The final manuscript has been read and approved by all the co-authors.

Информация о статье / Information about the article

Статья поступила в редакцию 22.11.2022; одобрена после рецензирования 06.02.2023; принята к публикации 10.03.2023.

The article was submitted 22.11.2022; approved after reviewing 06.02.2023; accepted for publication 10.03.2023.



К ЮБИЛЕЙНЫМ ДАТАМ

УДК 338.32.053.4

<https://doi.org/10.21285/2686-9993-2023-46-1-125-136>



Опыт работы Иркутского завода тяжелого машиностроения на рынке горно-обогатительного оборудования

Я.В. Мовшович^a, А.В. Кулешов^b, А.Е. Бурдонов^c, Ю.В. Новиков^d

^{a,b}ООО «ИЗТМ-Инжиниринг», г. Иркутск, Россия

^{c,d}Иркутский национальный исследовательский технический университет, г. Иркутск, Россия

Резюме. Статья посвящена опыту работы Иркутского завода тяжелого машиностроения (ИЗТМ, ныне ООО «ИЗТМ-Инжиниринг») в честь его 115-летия. За это время ИЗТМ прошел путь от мастерской для снабжения армии, сельскохозяйственного и механического завода до одного из крупнейших машиностроительных заводов России с полным циклом производства на территории Содружества Независимых Государств. Развитие на предприятии научной базы позволяет автоматизировать однотипные задачи, а также модернизировать оборудование с целью повышения его технологических показателей. В работе проанализированы результаты деятельности предприятия. Рассмотрена линейка производимого оборудования, пути его совершенствования и модернизации. Отличительной особенностью ИЗТМ является наличие мощностей литейного производства. В литейных цехах проводят плавку, формовку и термообработку продукции. Ключевым звеном, способствующим развитию предприятия, является конструкторское бюро, постоянно находящееся в поиске новых решений, которые наилучшим образом удовлетворяют потребности заказчиков в отношении промышленной и экономической эффективности, безопасности, надежности и срока службы проектируемого оборудования. Конструкторское бюро ИЗТМ использует современные средства конструирования оборудования и моделирования технологических процессов для последующего расчета технико-конструкционных параметров густительного оборудования, обеспечивающего высокую производительность, а также безопасную и эффективную эксплуатацию. На сегодняшний день на предприятии налажен серийный выпуск горно-обогатительного, шахтного и металлургического оборудования. Оборудование ИЗТМ работает более чем в 20 странах мира. Заказчиками завода являются крупнейшие компании, занятые на территории Российской Федерации в сфере горного дела, металлургии и нефтедобывающего производства.

Ключевые слова: Иркутский завод тяжелого машиностроения, обогащение, оборудование, машиностроение, сгущение, радиальный сгуститель, моделирование

Для цитирования: Мовшович Я.В., Кулешов А.В., Бурдонов А.Е., Новиков Ю.В. Опыт работы Иркутского завода тяжелого машиностроения на рынке горно-обогатительного оборудования // Науки о Земле и недропользование. 2023. Т. 46. № 1. С. 125–136. <https://doi.org/10.21285/2686-9993-2023-46-1-125-136>.

ANNIVERSARIES

Irkutsk heavy engineering plant experience in the market of mining and processing equipment

Yan V. Movshovich^a, Aleksey V. Kuleshov^b, Alexander E. Burdonov^c, Yury V. Novikov^d

^{a,b}Industrial Association "Irkutsk Heavy Machinery Plant", Irkutsk, Russia

^{c,d}Irkutsk National Research Technical University, Irkutsk, Russia

Abstract. The article celebrates the 115th anniversary of the Irkutsk heavy engineering plant (IHEP) and describes its operation experience. During this time, IHEP worked its way up from a workshop supplying the army, an agricultural and mechanical plant to one of the largest Russian machine-building plants with a full production cycle in the Commonwealth of Independent States. The scientific base developed at the enterprise makes it possible to automate the same type tasks, as well as to upgrade equipment in order to improve its technological performance. The article analyzes the operation results of the enterprise. A consideration is given to the line of manufactured equipment, its improvement and modernization methods. A distinctive feature of IHEP is the availability of foundry facilities, which carry out melting, molding and heat treatment of products. A key element contributing to the development of the enterprise is the design office, which is constantly in search of new solutions that best meet the needs of customers in terms of industrial and economic efficiency,

© Мовшович Я.В., Кулешов А.В., Бурдонов А.Е., Новиков Ю.В., 2023



safety, reliability and service life of the designed equipment. The IHEP Design Bureau uses modern tools for equipment design and flow processes modeling for subsequent calculation of the technical and design parameters of thickening equipment, which ensures high performance, as well as safe and efficient operation. Today, the enterprise has launched a serial production of mining and processing equipment, as well as mine machinery and metallurgical equipment. IHEP equipment is supplied to more than 20 countries around the world. The plant's customers are the largest companies of the Russian Federation, which operate in the field of mining, metallurgy and oil production.

Keywords: Irkutsk heavy engineering plant, concentration, equipment, machine-building, thickening, radial thickener, simulation

For citation: Movshovich Ya.V., Kuleshov A.V., Burdonov A.E., Novikov Yu.V. Irkutsk heavy engineering plant experience in the market of mining and processing equipment. *Nauki o Zemle i nedropol'zovanie = Earth sciences and subsoil use*. 2023;46(1):125-136. (In Russ.). <https://doi.org/10.21285/2686-9993-2023-46-1-125-136>.

Введение

Отрасль по производству горно-обогательного оборудования включает широкий спектр машин, используемых при разработке и обогащении руд цветных и благородных металлов [1, 2], углей [3] и химического сырья. На сегодняшний день на территории Российской Федерации расположено более 20 крупных предприятий по производству обогащенного оборудования. Крупнейшими производителями являются такие компании, как ОАО «Машиностроительный завод Труд», ЗАО «ИТОМАК», НПК «Механобр-техника», ООО «ПКФ Тульские машины», ООО УК «УЗТМ-КАРТЭКС», АО «Тяжмаш», ООО «ИЗТМ-Инжиниринг» (Иркутский завод тяжелого машиностроения, ИЗТМ), ЗАО «Дробмаш» и другие [4–7]. Лидером же производства за 2020 г. считается Южный федеральный округ, на долю которого в тот период приходилось около 80 % от общего произведенного объема.

На протяжении последних нескольких лет наблюдается как спад, так и подъем производства машин для сортировки, грохочения, сепарации или промывки грунта, камня, руды и прочих минеральных веществ. В 2020 г. в России было произведено около 7000 машин для предприятий по переработке минеральных веществ, что на 5,3 % меньше объема производства предыдущего года.

Существующая динамика обусловлена последствиями распространения новой коронавирусной инфекции (COVID-19) в силу вводимых карантинных мероприятий, временного снижения инвестиционной активности, увеличения сроков проработки проектов, логистических проблем из-за закрытия международных границ [8, 9].

Следует отметить, что в 2021 г. отложенная деловая активность была реализована

наращиванием объемов производства, вследствие чего наблюдалось значительное увеличение спроса на машиностроительную продукцию до 30 % по сравнению с предшествующим периодом. Данный факт обусловлен ограничением поставок из-за рубежа, в частности из Китая, в связи с закрытием международных границ, вводом в эксплуатацию новых месторождений, а также уходом с рынка части иностранных производителей.

На основании анализа данных из открытых источников установлено, что доля импортной продукции на российском рынке составляет около 27 %. Доля экспорта в объеме внутреннего производства на рынке производства составляет не более 10 %.

Учитывая значительный спектр производимого обогащенного оборудования, каждое из указанных выше предприятий имеет свои особенности и уникальный ассортимент выпускаемой продукции. На основе анализа их деятельности направления, в которых работают данные организации, можно классифицировать по следующим позициям:

- оборудование для дробления и измельчения минерального сырья [10];
- оборудование для гравитационного обогащения [11, 12];
- флотационное оборудование [13];
- оборудование для сгущения пульпы и осветления сточных вод [14];
- иное оборудование.

Значительную долю рынка из представленного перечня составляет оборудование для сгущения пульпы и осветления сточных вод. Основными производителями в данном сегменте являются ООО «ИЗТМ-инжиниринг» (г. Иркутск) и ОАО «Машиностроительный завод Труд» (г. Новосибирск). Среди иностранных производителей можно выделить компании



Metso Outotec Oyj (Финляндия) и FLSmidth & Co. A/S (Дания) [15, 16].

В данной работе представлен опыт ИЗТМ в области конструирования, производства и автоматизации радиальных сгустителей, а также иного обогащательного оборудования.

История предприятия

Исторически машиностроительное направление Иркутской области производило около 11 % продукции для общероссийского рынка. Более 90 % выпускаемой продукции вывозилось за пределы области, и лишь несколько заводов региона были ориентированы на собственные нужды. Именно таковым предприятием являлся ИЗТМ [17].

Первые сведения о деятельности ИЗТМ относятся к 1 января 1907 г. [18]. В тот год в Иркутске открылись механические обозные мастерские, основной деятельностью которых являлось снабжение российской армии. В 1912 г. к мастерским присоединили частный завод по литью чугуна. В 1920 г. предприятие было передано из военного ведомства в Иркутский губернский совет народного хозяйства, по инициативе которого 16 марта 1920 г. оно было переименовано в Сельскохозяйственный завод и стало наряду с продукцией для военного ведомства выпускать сельхозинвентарь.

2 ноября 1928 г. мастерские постановили передать обществу «Добролет» с целью оборудования авиаремонтных мастерских. Правда, всего через несколько месяцев, 14 марта 1929 г., между обществом «Добролет» и акционерным обществом «Союззолото» был заключен договор, по которому мастерские переходили в ведение «Союззолота». Чуть позже, 6 апреля того же года, было принято постановление об организации «...завода на основе самостоятельной производственной единицы «Союззолото», работающей на хозрасчете и под непосредственным подчинением правлению «Союззолото»». Вскоре после этого акционерным обществом было принято положение об Иркутском механическом заводе¹.

После вхождения в систему «Союззолото» предприятие сосредоточилось на выпуске оборудования для золотодобывающей промышленности, что и определило дальнейший вектор его развития. Завод строился быстрыми темпами: открывались новые цеха, вводились в эксплуатацию новые корпуса. В 1930 г. Иркутскому механическому заводу было присвоено имя выдающегося государственного и партийного деятеля В.В. Куйбышева. На тот момент на предприятии начался выпуск различного бурового оборудования, скреперов, мониторов, труб и гидравлических устройств. Кроме того, в задачу завода входило капитальное устройство компрессоров перфораторов и рудничных механизмов² [18].

Главной продукцией завода всегда было и по сей день остается дражное оборудование. В 1930 г. в эксплуатацию был введен механический цех и завод приступил к выпуску паровых драг емкостью 150 литров, в связи с чем прирост продукции предприятия увеличился на 15,3 % [8].

25 октября 1941 г. завод перешел в ведение Народного комиссариата тяжелого машиностроения СССР и получил новое название – Иркутский завод тяжелого машиностроения имени В.В. Куйбышева³. В годы войны завод, как и большинство предприятий страны, был ориентирован на снабжение армии и флота. В ноябре этого же года на предприятие прибыло оборудование Старокраматорского завода тяжелого машиностроения, эвакуированного из Донбасса.

В первые послевоенные годы предприятие занималось разработкой и выпуском новых типов драг, намоточных аппаратов, волочильных станов, двухленточной разливной машины, грохотов типа «Джайрекс». Дальнейшее развитие предприятия сопровождалось производством новых электрических драг, классификаторов, сгустителей, перекидных систем для мартеновских печей, прокатного и металлургического оборудования, а также различных гидромеханизмов. Значительная часть производимой продукции была усовершенствована и производится по сей день.

¹ История // Иркутский завод тяжелого машиностроения [Электронный ресурс]. URL: <http://iztm.ru/about/istoriya/> (30.05.2022).

² Там же.

³ Там же.



В 1960–1980-е гг. на предприятии строились новых цеха и происходила модернизация производства. Сложившаяся в отрасли машиностроения специализация завода в основном сохранялась и была представлена производством машин для горного дела, черной и цветной металлургии.

С 1971 г. стала возрастать роль обогащенного оборудования, выпуск которого в то время получил мощный импульс. Происходила модернизация продукции, были созданы новые типы специализированных классификаторов для нерудной промышленности. Типаж сгустителей увеличился с 6 типоразмеров до 19. Основное внимание при разработке обогащенного оборудования уделялось увеличению производительности, усилению надежности и упрощению кинематических схем.

В течение следующих 30 лет предприятие являлось одним из важнейших поставщиков горно-обогатительного и металлургического оборудования в стране. В 1992 г. оно было преобразовано в ОАО «Иркутский завод тяжелого машиностроения». Вследствие экономической нестабильности в стране на предприятии была остановлена значительная часть производства. Тем не менее оно вело активную деятельность и с 1997 г. поставило на рынок более двух десятков обогатительных приборов КОУ 1200 «Ромашка». В 2012 г. им был получен первый заказ на изготовление металлоконструкций для космодрома «Восточный»⁴.

На сегодняшний день ООО «ИЗТМ-Инжиниринг» является одним из крупнейших машиностроительных предприятий Российской Федерации. В 2022 г. ему исполнилось 115 лет.

Продукция

В настоящее время производственные мощности в Иркутске позволяют изготавливать более 7000 т продукции в год⁵. Сфера деятельности рассматриваемого предприятия охватывает полный цикл создания в первую очередь горно-обогатительного, металлургического и шахтного оборудования: это разработка проектной документации, выбор техно-

логий, изготовление, контроль качества, а также поставка и пуско-наладочные работы. На сегодняшний день ИЗТМ выпускается более 50 видов различного оборудования для горно-обогатительной и металлургической отраслей⁶:

- дражное оборудование;
- промывочное оборудование;
- горно-обогатительное оборудование (радиальные и пластинчатые сгустители, спиральные классификаторы, контактные чаны, зумпфы и питатели) (рис. 1);
- оборудование для металлургии и коксохимического производства (доменное оборудование, сталеплавильное, разливочные машины, затворы, специальный рельсовый транспорт и др.).

Помимо непосредственного производства оборудования предприятие имеет мощности литейного производства. В литейных цехах проводят плавку, формовку и термообработку продукции.

Развитие производства

На данный момент общая численность ИЗТМ составляет около 600 человек, из них 60 сотрудников, в том числе около 30 конструкторов, относятся к инженерному персоналу.

Ключевым звеном, способствующим развитию предприятия, является конструкторское бюро, постоянно находящееся в поиске новых решений, которые наилучшим образом удовлетворяют потребности заказчиков в отношении промышленной и экономической эффективности, безопасности, надежности и срока службы проектируемого оборудования. На сегодняшний день конструкторское бюро ИЗТМ использует современные средства конструирования оборудования и моделирования технологических процессов с целью последующего расчета технико-конструкционных параметров сгустительного оборудования, обеспечивающего высокую производительность, а также безопасную и эффективную эксплуатацию (рис. 2).

⁴ История // Иркутский завод тяжелого машиностроения [Электронный ресурс]. URL: <http://iztm.ru/about/istoriya/> (30.05.2022).

⁵ Новости // Иркутский завод тяжелого машиностроения [Электронный ресурс]. URL: <http://iztm.ru/press-tsentr/novosti/> (30.05.2022).

⁶ Там же.

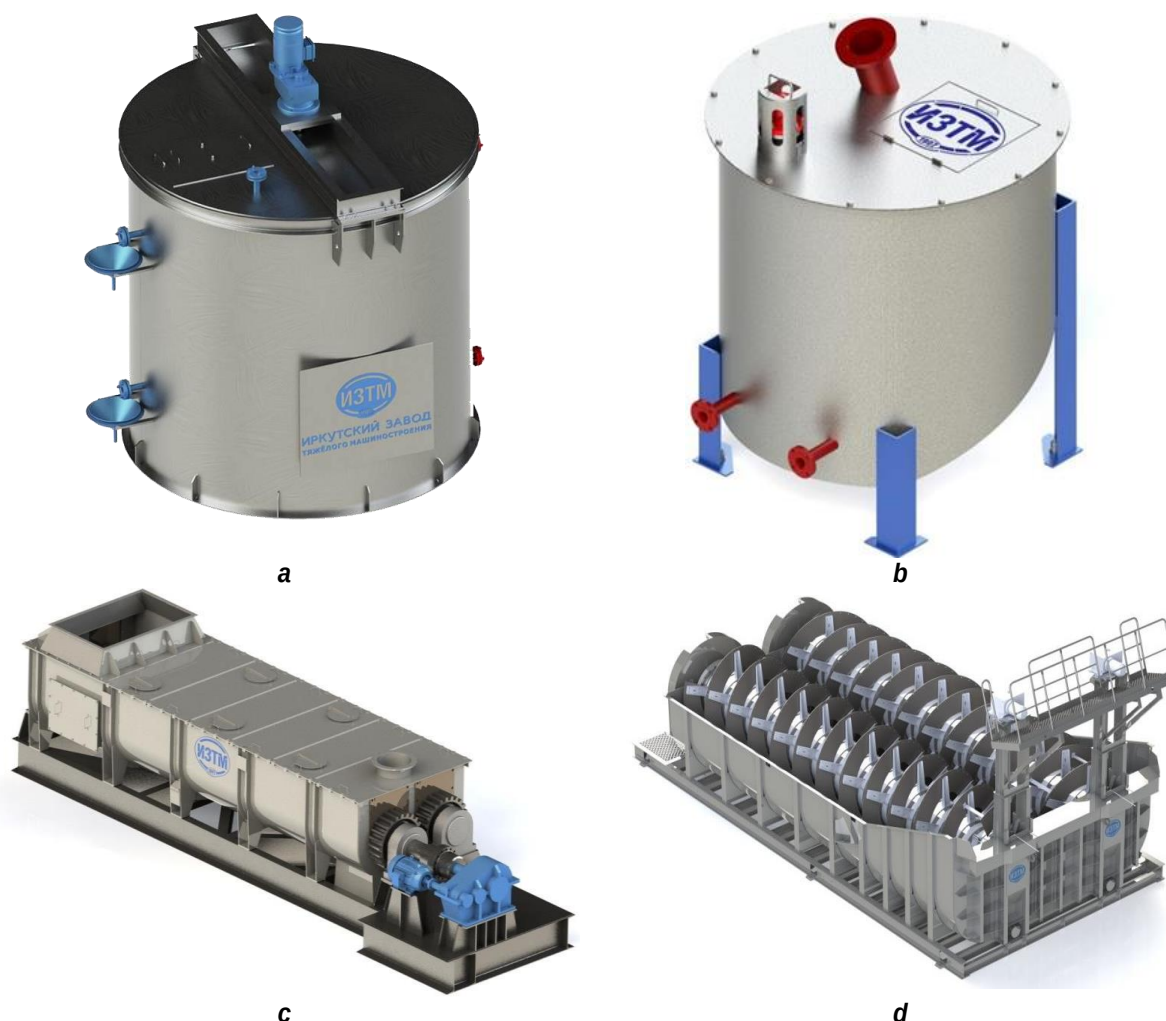


Рис. 1. Модели оборудования для горно-обогатительной индустрии:

a – контактный чан; b – зумпф; c – шнековый смеситель; d – двуспиральный классификатор

Fig. 1. Equipment designs for mining and processing industry:

a – conditioning tank; b – sump; c – screw mixer; d – double-spiral classifier

Предприятие активно взаимодействует с Иркутским национальным исследовательским техническим университетом (ИРНИТУ). Студенты университета, обучающиеся на самых различных специальностях, регулярно проходят на ИЗТМ ознакомительную и производственную практику. Часть обучающихся после окончания университета трудоустраивается на предприятии.

В ИРНИТУ, в том числе при поддержке ИЗТМ, в настоящее время реализуется программа дополнительной подготовки «Инженер-конструктор». Данная программа позволит получить подготовленных специалистов с учетом специфики предприятия, а также покрыть кадровые запросы компании в связи с увеличением объемов производства.

На сегодняшний день ИЗТМ занимается

разработкой новых видов оборудования, а также совершенствованием существующего оборудования с использованием систем моделирования (модернизация загрузочного колдодца сгустителя). Особое внимание уделяется разработке электромеханического привода радиального сгустителя с изготовлением более 90 % узлов на собственных мощностях, а также интеграцией в сложные автоматизированные системы управления.

Оборудование ИЗТМ применяется на производственных площадках крупнейших горно-обогатительных и металлургических предприятий, таких как ПАО «ГМК «Норильский никель», ПАО «Магнитогорский металлургический комбинат», международная компания EVRAZ plc, АО «РУСАЛ», АК «АЛРОСА», ПАО «Лензолото», АО «СУСУМАНЗОЛОТО», ПАО «Мечел» и др.

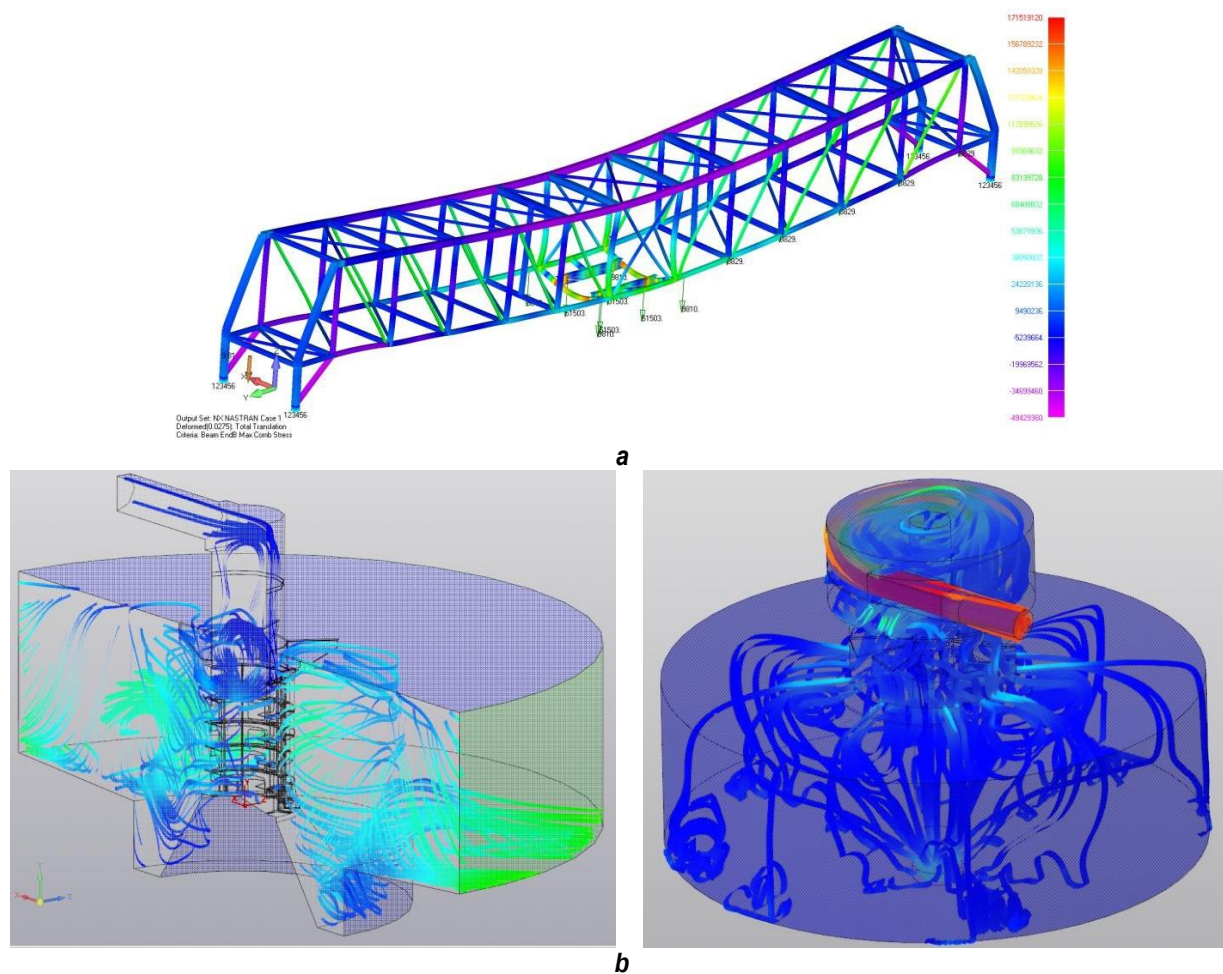


Рис. 2. Примеры использования программных комплексов:

- a – моделирование напряженно-деформированного состояния конструкций сгустителя;
b – моделирование процессов гидродинамики в загрузочном колодце сгустителя*

Fig. 2. Examples of using software systems:

- a – simulation of the stress-strain state of thickener designs;
b – simulation of hydrodynamic processes in the thickener feedwell*

Производство сгустителей

Более 20 % всей выпускаемой продукции ИЗТМ приходится на производство сгустителей. В данный класс оборудования входят сгустители и отстойники как с центральным, так и с периферическим приводом. Диаметр радиальных сгустителей, выпускаемых предприятием, варьирует от 3 до 100 м (рис. 3). Для рациональной и эффективной работы сгустителей в процессе их эксплуатации на предприятии производится индивидуальный подбор оборудования под каждый вид материала. Ко всему прочему, ИЗТМ осуществляет полное сопровождение проектов в области сгущения пульп и осветления сточных вод различных отраслей промышленности (обогащение, металлургия, химическая промышленность).

С 2017 г. на предприятии производится успешная глубокая модернизация действующего

обогащательного оборудования, а именно радиальных сгустителей. В основе модернизации предусмотрено принципиальное изменение типа привода (с периферического на центральный) и установка нового комплекта всех механических узлов с высокой степенью производительности. Это и улучшенная система загрузочного колодца, и эффективная приводная часть, оснащенная не только системами вращения, но и механизмами подъема перегребающего устройства. Это также интеграция оборудования сгустителя в автоматизированную систему управления технологическим процессом фабрик и контроль технологических параметров в автоматическом режиме. В результате модернизации производственные показатели увеличиваются на объемы, составляющие до 30–50 % от первоначальных.

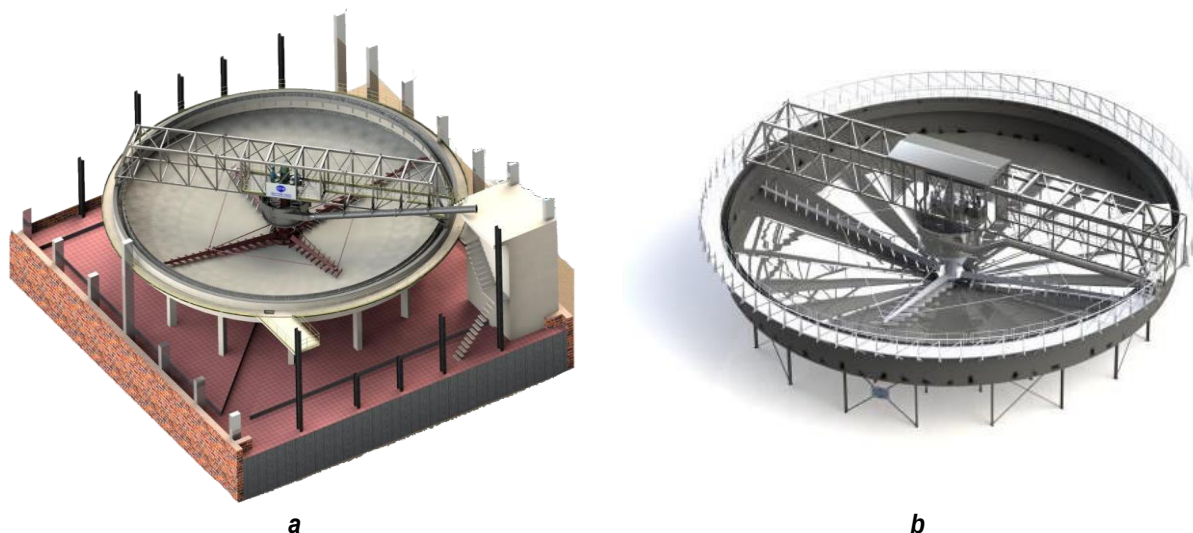


Рис. 3. Модели радиальных сгустителей:
а – с железобетонным чаном; б – с металлическим чаном
Fig. 3. Radial thickener models:
a – with a reinforced concrete tank; b – with a metal tank

ИЗТМ в своем оборудовании использует не только редукторы собственного производства, но также и современные планетарные мотор-редукторы отечественного и зарубежного производства (Италия). Данные комплектующие отличаются более высоким коэффициентом полезного действия и лучшей энергоэффективностью.

С 2018 г. ИЗТМ совместно с Научно-исследовательским институтом по удобрениям и инсектофунгицидам им. проф. Я.В. Самойлова группы компаний «ФосАгро» изучает возможность внедрения технологии тонкослойного сгущения в радиальных сгустителях (как действующих, так и новых) с целью увеличения площади осаждения, улучшения чистоты слива, а также снижения потребления флокулянтов. В рамках данного сотрудничества было произведено несколько вариантов промышленных установок и проведены эксперименты на фабрике «ФосАгро» в г. Балаково, получены положительные результаты эксперимента. Ведется дальнейшая деятельность по разработке оборудования.

Исследования

ИЗТМ проводит комплекс лабораторных и полупромышленных исследований с целью подбора типоразмера сгустителя, а также разработки рекомендаций по ведению технологического процесса. В структуру предприятия входит исследовательская лаборатория по

изучению качественно-количественных характеристик концентратов и хвостов. В процессе исследований используется уникальная установка по исследованию процесса сгущения пульп, сконструированная с учетом особенностей производимого на ИЗТМ оборудования.

В рамках развития производства ИЗТМ также ведет взаимодействие с ИРННТУ. На кафедре обогащения полезных ископаемых и охраны окружающей среды им. С.Б. Леонова ИРННТУ проводятся исследования по эффективности расслоения суспензий в сгустительном оборудовании. В ходе данных исследований осуществляется изучение особенностей гранулометрического состава и формы частиц с использованием лазерного анализатора частиц Analysette-22 NanoTec plus, также с использованием двухлучевого сканирующего микроскопа (многолучевая система) JIB-4500, оснащенного электронной пушкой LaB6, выполняется дальнейший анализ и расчет влияния данных характеристик на процессы осаждения и уплотнения. Помимо прочего, на лабораторных установках ведутся работы по статическому и динамическому сгущению, в том числе подбор реагентного режима с использованием флокулянтов различных производителей (рис. 4). Проводимые исследования позволяют значительно повысить качество подбора технико-технологических параметров проектируемого оборудования.

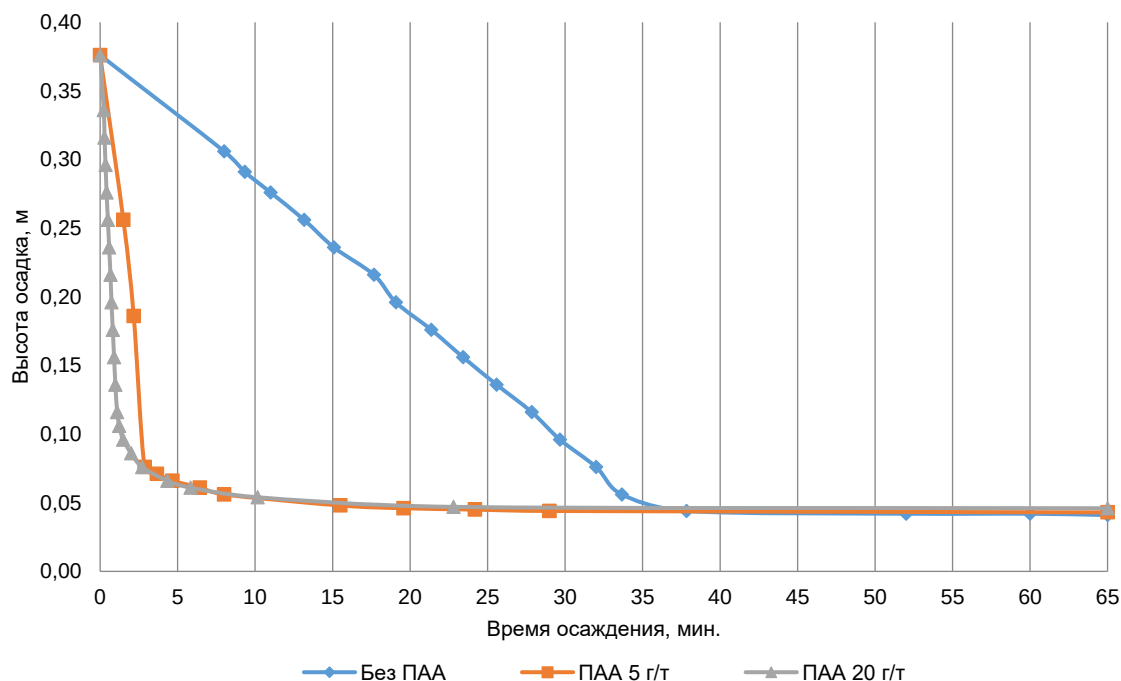


Рис. 4. Пример результатов исследований по изучению влияния флокулянта на скорость осаднения твердых частиц

Fig. 4. An example of research results on the study of a flocculant effect on solid particle settling rate

Выбор основных параметров оборудования

Для расчета конструктивных параметров сгустителей на основании полученных данных используется программное обеспечение «Расчет сгустителя» (свидетельство о государственной регистрации программ для ЭВМ № 2022616114)⁷, разработанное совместно сотрудниками ИЗТМ и ИРНТУ.

Разработанная программа (рис. 5) предназначена для облегчения работы инженера-проектировщика при расчете параметров радиальных сгустителей. Данный программный продукт позволяет быстро и качественно производить расчет оптимальных параметров сгустителя. В него заложена база данных исследований по сгущению различных материалов, наработанная организациями, что при отсутствии части входных характеристик материала позволяет выбрать схожий продукт и произвести расчет скорости осаднения. Также в нем имеется функция по расчетному определению скорости осаднения на основе

закона Стокса, при осуществлении которого, как известно, учитываются гранулометрические характеристики материала и гидродинамические и температурные свойства среды, в которой происходит осаднение частиц. В результате происходит формирование отчета с указанием исходных данных по перерабатываемому сырью, включающего полный технологический расчет. В дальнейшем планируется совершенствование программного продукта и добавление в него математической модели осаднения частиц в пристенном слое сгустителя, что повысит точность технологических данных и позволит спроектировать оптимальную конструкцию оборудования.

Заключение

ИЗТМ имеет непростую, но в то же время очень интересную историю. За 115 лет данное предприятие из мастерской выросло в одну из крупнейших компаний России, и сегодня ООО «ИЗТМ-Инжиниринг» объединяет современные возможности производства и нако-

⁷ Бурдонов А.Е., Жошкин В., Лукьянов М.Г., Лукьянов Н.Д., Мовшович Я.В. Расчет сгустителей (свидетельство о регистрации программы для ЭВМ № 2022616114, 05.04.2022). Заявка № 2022611048 от 26.01.2022.



File Edit View Window Help

Наименование предприятия

Назначение оборудования

Производительность по твердому

Скорость осаждения

☒ Значение по таблице [Выбрать](#) ☐ Произвольное значение ☐ Расчетное по Стоксу

Содержание твердого в питании

Содержание твердого в сгущенном продукте

Количество сгустителей

Плотность твердого

Рассчитать

Диаметр сгустителя

Высота сгустителя

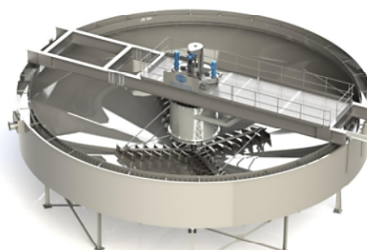


Рис. 5. Интерфейс программного продукта «Расчет сгустителя»
Fig. 5. Interface of the "Thickener calculation" software product

пленный научно-технический потенциал. В настоящее время предприятие предлагает комплекс технологических решений для реализации проектов в горно-обогатительном кластере, черной и цветной металлургии и смежных отраслях. Показателем развития ИЗТМ

является выпуск нового оборудования и конструкторский решений. Развитие научной базы на заводе позволяет автоматизировать однотипные задачи, а также модернизировать оборудование с целью повышения его технологических показателей.

Список источников

1. Fiscor S., Leonida C., Jensen J., Morton J. MIN-Expo is Back: Mining suppliers and service providers plan to showcase the latest in mining and mineral processing equipment and technology // Coal Age. 2021. Vol. 126. Iss. 6. P. 28–39.
2. Li Z., Liu X. Talking about the damage analysis and processing technology improvement method of a coal mining equipment walking mechanism in Shendong coal mine // 2020 International Conference on Artificial Intelligence and Electromechanical Automation. 2020. P. 569–572. <https://doi.org/10.1109/AIEA51086.2020.00127>.
3. Васильева М.А. Тенденции развития насосного оборудования горно-обогатительных предприятий (обзор) // Обогащение руд. 2019. № 1. С. 51–56. <https://doi.org/10.17580/or.2019.01.08>.
4. Алгебраистова Н.К., Макшанин А.В., Бурдакова

- Е.А., Самородский П.Н., Маркова А.С. Разработка стадийной гравитационной схемы извлечения благородных металлов // Обогащение руд. 2015. № 2. С. 3–7.
5. Вайсберг Л.А., Коровников А.Н., Трофимов В.А. Модернизация технологических циклов грохочения на основе инновационного оборудования (к 100-летию института «Механообр») // Горный журнал. 2017. № 1. С. 11–17. <https://doi.org/10.17580/gzh.2017.01.02>.
6. Кулешов А.В., Еремеев В.К. Особенности расчета на прочность литых и сварных несущих конструкций тележки шлаковоза/чугуновоза // Вестник Иркутского государственного технического университета. 2016. № 3. С. 24–31.
7. Плаkitкина Л.С., Плаkitкин Ю.А., Дьяченко К.И. Оценка производственного потенциала отечественных машиностроительных предприятий для реализации



программы импортозамещения в угольной отрасли // Уголь. 2021. № 1. С. 34–42. <https://doi.org/10.18796/0041-5790-2021-1-34-42>.

8. Zimmerling A., Chen X. Innovation and possible long-term impact driven by COVID-19: manufacturing, personal protective equipment and digital technologies // *Technology in Society*. 2021. Vol. 65. P. 101541. <https://doi.org/10.1016/j.techsoc.2021.101541>.

9. Jain P.K. Impact of lockdown on the mining industry in India // *Mineral Economics*. 2021. Vol. 34. Iss. 2. P. 331–335. <https://doi.org/10.1007/s13563-021-00263-6>.

10. Майоров С.А., Лагунова Ю.А. Достоинства и недостатки мобильных дробилок // Горное оборудование и электромеханика. 2019. № 3. С. 18–26. <https://doi.org/10.26730/1816-4528-2019-3-18-26>.

11. Пелих В.В., Салов В.М., Бурдонов А.Е., Лукьянов Н.Д. Применение Knelson CVD-технологии для обогащения золото-свинцовой руды // Обогащение руд. 2019. № 1. С. 3–11. <https://doi.org/10.17580/or.2019.01.01>.

12. Сенченко А.Е., Федотов К.В., Федотов П.К., Бурдонов А.Е. Технологическая оценка обогатимости руды гравитационными методами // Известия Тульского государственного университета. Науки о Земле. 2020. № 4. С. 262–280.

13. Кондратьев С.А., Коваленко К.А. Крупность флотируемых частиц в импеллерных флотомашинах //

Физико-технические проблемы разработки полезных ископаемых. 2021. № 2. С. 106–118. <https://doi.org/10.15372/FTPRI20210212>.

14. Смирнов А.В., Махлай К.А., Левченко О.В. Технологические аспекты работы современных отстойников // Наилучшие доступные технологии водоснабжения и водоотведения. 2020. № 3. С. 55–63.

15. Арабаджи Я.Н., Оленников А.С., Курчуков А.М., Лихачева Т.А. Реконструкция оборудования отделения сгущения Талнахской обогатительной фабрики по технологии HRT компании Outotec // Цветные металлы. 2018. № 6. С. 38–43. <https://doi.org/10.17580/tsm.2018.06.05>.

16. Yuan Z.L., Li X.R., Wu D., Ban X.J., Wu N.-Q., Dai H.-N., Wang H. Continuous-time prediction of industrial paste thickener system with differential ODE-net // *IEEE/CAA Journal of Automatica Sinica*. 2022. Vol. 9. Iss. 4. P. 686–698. <https://doi.org/10.1109/JAS.2022.105464>.

17. Салаев А.В. О состоянии, проблемах и перспективах минерально-сырьевой базы золота Иркутской области // Золото и технологии. 2017. № 4. С. 92–93.

18. Серебренникова Э.Г., Швеиц М.Г., Ластовская В.А. [и др.]. Первенец тяжелого машиностроения Восточной Сибири: очерк истории Иркутского Ордена Трудового Красного Знамени завода тяжелого машиностроения имени В.В. Куйбышева. М.: Мысль, 1983. 236 с.

References

1. Fiscor S., Leonida C., Jensen J., Morton J. MIN-Expo is Back: Mining suppliers and service providers plan to showcase the latest in mining and mineral processing equipment and technology. *Coal Age*. 2021;126(6):28-39.

2. Li Z., Liu X. Talking about the damage analysis and processing technology improvement method of a coal mining equipment walking mechanism in Shendong coal mine. *2020 International Conference on Artificial Intelligence and Electromechanical Automation*. 2020;569-572. <https://doi.org/10.1109/AIEA51086.2020.00127>.

3. Vasilyeva M.A. An overview of development trends for the pumping equipment of mining and processing enterprises. *Obogashchenie rud*. 2019;1:51-56. (In Russ.). <https://doi.org/10.17580/or.2019.01.08>.

4. Algebraistova N.K., Makshanin A.V., Burdakova E.A., Samorodskii P.N., Markova A.S. Development of a stage gravity flowsheet for recovery of noble metals. *Obogashchenie rud*. 2015;2:3-7. (In Russ.).

5. Vaisberg L.A., Korovnikov A.N., Trofimov V.A. Innovative re-equipment of screening circuits (to commemorate the 100th anniversary of the Mekhanobr Institute). *Gornyi zhurnal*. 2017;1:11-17. (In Russ.). <https://doi.org/10.17580/gzh.2017.01.02>.

6. Kuleshov A.V., Eremeev V.K. Strength calculation features of cast and welded bearing structures of slag-pot and hot-metal transfer car carriers. *Vestnik Irkutskogo gosudarstvennogo tekhnicheskogo universiteta = Proceedings of Irkutsk State Technical University*. 2016;3:24-31. (In Russ.).

7. Plakitkina L.S., Plakitkin Yu.A., Dyachenko K.I. Assessment of the production potential of domestic machine-

building companies for implementation of the import substitution program in the coal industry. *Ugol' = Russian Coal Journal*. 2021;1:34-42. (In Russ.). <https://doi.org/10.18796/0041-5790-2021-1-34-42>.

8. Zimmerling A., Chen X. Innovation and possible long-term impact driven by COVID-19: manufacturing, personal protective equipment and digital technologies. *Technology in Society*. 2021;65:101541. <https://doi.org/10.1016/j.techsoc.2021.101541>.

9. Jain P.K. Impact of lockdown on the mining industry in India. *Mineral Economics*. 2021;34(2):331-335. <https://doi.org/10.1007/s13563-021-00263-6>.

10. Mayorov S.A., Lagunova Yu.A. Advantages and disadvantages of mobile crushers. *Gornoe oborudovanie i elektromekhanika = Mining Equipment and Electromechanics*. 2019;3:18-26. (In Russ.). <https://doi.org/10.26730/1816-4528-2019-3-18-26>.

11. Pelikh V.V., Salov V.M., Burdonov A.E., Lukyanov N.D. Application of Knelson CVD technology for beneficiation of gold-lead ore. *Obogashchenie rud*. 2019;1:3-11. (In Russ.). <https://doi.org/10.17580/or.2019.01.01>.

12. Senchenko A.E., Fedotov K.V., Fedotov P.K., Burdonov A.E. Technological evaluation of ore processibility gravitational methods. *Izvestiya Tul'skogo gosudarstvennogo universiteta. Nauki o Zemle = News of the Tula state university. Sciences of Earth*. 2020;4:262-280. (In Russ.).

13. Kondrat'ev S.A., Kovalenko K.A. Coarseness of particles in flotation in impeller-type cells. *Fiziko-tekhnicheskie problemy razrabotki poleznykh iskopaemykh*. 2021;2:106-118. (In Russ.). <https://doi.org/10.15372/FTPRI20210212>.



14. Smirnov A.V., Makhlai K.A., Levchenko O.V. Technological aspects of modern thickener operation. *Nailuchshie dostupnye tekhnologii vodosnabzheniya i vodoootvedeniya*. 2020;3:55-63. (In Russ.).

15. Arabadzhi Ya.N., Olennikov A.S., Kurchukov A.M., Likhachova T.A. Thickening equipment modernization with supaflo process (Outotec) at Talnakh Concentrator. *Tsvetnye metally*. 2018;6:38-43. (In Russ.). <https://doi.org/10.17580/tsm.2018.06.05>.

16. Yuan Z.L., Li X.R., Wu D., Ban X.J., Wu N.-Q., Dai H.-N., Wang H. Continuous-time prediction of industrial

paste thickener system with differential ODE-net. *IEEE/CAA Journal of Automatica Sinica*. 2022;9(4):686-698. <https://doi.org/10.1109/JAS.2022.105464>.

17. Salaev A.V. On the state, problems and prospects of the mineral resource base of gold in the Irkutsk region. *Zoloto i tekhnologii*. 2017;4:92-93. (In Russ.).

18. Serebrennikova E.G., Shvets M.G., Lastovskaya V.A., et al. The pioneer of heavy engineering in Eastern Siberia: an essay on the history of the Irkutsk Order of the Red Banner of Labor Heavy Engineering Plant named after V.V. Kuibyshev. Moscow: Mysl'; 1983. 236 p. (In Russ.).

Информация об авторах / Information about the authors



Мовшович Ян Вячеславович,

заместитель коммерческого директора –
руководитель направлений «Горно-обогатительное оборудование»,
«Горно-шахтное оборудование», «Металлоконструкции»,
ООО «ИЗТМ-Инжиниринг»,
г. Иркутск, Россия,
myan@iztm.ru

Yan V. Movshovich,

Deputy Commercial Director – Head of directions of "Mining
and Processing Equipment", "Mining Equipment", "Metal Structures",
Industrial Association "Irkutsk Heavy Machinery Plant",
Irkutsk, Russia,
myan@iztm.ru



Кулешов Алексей Владимирович,

начальник конструкторского бюро обогатительного оборудования,
ООО «ИЗТМ-Инжиниринг»,
г. Иркутск, Россия,
kualeksey@iztm.ru

Aleksey V. Kuleshov,

Head of the Design Bureau of Processing Equipment,
Industrial Association "Irkutsk Heavy Machinery Plant",
Irkutsk, Russia,
kualeksey@iztm.ru



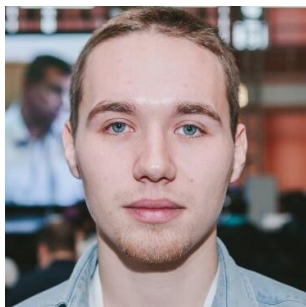
Бурдонов Александр Евгеньевич,

кандидат технических наук, доцент,
доцент кафедры обогащения полезных ископаемых
и охраны окружающей среды им. С.Б. Леонова,
Институт недропользования,
Иркутский национальный исследовательский технический университет,
г. Иркутск, Россия,
slimbul@inbox.ru

<https://orcid.org/0000-0001-5298-445X>

Alexander E. Burdonov,

Cand. Sci. (Eng.), Associate Professor,
Associate Professor of the Department of Mineral Processing
and Environmental Protection named after S.B. Leonov,
Institute of Subsoil Use,
Irkutsk National Research Technical University,
Irkutsk, Russia,
slimbul@inbox.ru
<https://orcid.org/0000-0001-5298-445X>



Новиков Юрий Витальевич,
аспирант,
Институт недропользования,
Иркутский национальный исследовательский технический университет,
г. Иркутск, Россия,
✉ 89500505553r@gmail.com
<https://orcid.org/0000-0001-5038-0628>
Yury V. Novikov,
Postgraduate Student,
Institute of Subsoil Use,
Irkutsk National Research Technical University,
Irkutsk, Russia,
✉ 89500505553r@gmail.com
<https://orcid.org/0000-0001-5038-0628>

Вклад авторов / Contribution of the authors

Все авторы сделали эквивалентный вклад в подготовку публикации.
The authors contributed equally to this article.

Конфликт интересов / Conflict of interests

Авторы заявляют об отсутствии конфликта интересов.
The authors declare no conflicts of interests.

Все авторы прочитали и одобрили окончательный вариант рукописи.
The final manuscript has been read and approved by all the co-authors.

Информация о статье / Information about the article

Статья поступила в редакцию 16.01.2023; одобрена после рецензирования 21.02.2023; принята к публикации 06.03.2023.

The article was submitted 16.01.2023; approved after reviewing 21.02.2023; accepted for publication 06.03.2023.



Уважаемые авторы!

Требования к оформлению научных статей, изложенные ниже, разработаны редакцией журнала для того, чтобы помочь Вам предоставить все необходимые для публикации сведения и избежать наиболее распространенных ошибок.

1. Научный журнал «Науки о Земле и недропользование» принимает к публикации научные материалы в виде статей по следующим специальностям:

- 1.6.9. Геофизика (технические науки);
- 1.6.9. Геофизика (геолого-минералогические науки);
- 1.6.10. Геология, поиски и разведка твердых полезных ископаемых, минерагения (геолого-минералогические науки);
- 2.8.1. Технология и техника геолого-разведочных работ (технические науки);
- 2.8.3. Горнопромышленная и нефтегазопромысловая геология, геофизика, маркшейдерское дело и геометрия недр (технические науки);
- 2.8.3. Горнопромышленная и нефтегазопромысловая геология, геофизика, маркшейдерское дело и геометрия недр (геолого-минералогические науки).

2. Приоритетными для публикации являются статьи в области междисциплинарных и мультидисциплинарных исследований, а также результаты работ с использованием цифровых технологий.

3. Статьи принимаются на русском, английском, китайском и монгольском языках от авторов, работающих в российских и иностранных вузах, академических и отраслевых научно-исследовательских институтах, а также производственных горно-геологических организациях.

4. Статья сопровождается:

- электронными версиями всех документов (скан), в том числе: авторского заявления, заполненного и подписанного всеми соавторами статьи; авторского договора; сведений обо всех авторах на русском и английском языках с указанием названия места работы, должности и структурного подразделения, наличия ученой степени, ученого звания, почтового и электронного адресов каждого автора статьи, а также номера телефона автора, ответственного за коммуникацию; акта экспертного заключения о возможности открытой публикации материалов;
- цветными портретными фотографиями авторов на светлом фоне (деловой стиль) в хорошем качестве в формате PNG / JPEG;
- по желанию автора в статье могут быть указаны его профили в системах цитирования и другие сведения (профили в РИНЦ, ORCID, Scopus, в других системах цитирования, можно предоставить ссылку на личную страницу в Интернете, включая страницы в социальных сетях).

Обращаем Ваше внимание, что вся перечисленная выше информация публикуется в журнале в открытом доступе!

5. Статьи принимаются ответственным секретарем в электронном виде в формате Microsoft Word для Windows по электронной почте nzn@istu.edu. Шрифт – Arial, размер шрифта – 12 (строки через 1 интервал), перенос слов – автоматический. Параметры страницы: отступы сверху и снизу – 2,5 см, слева и справа – 2 см, абзацный отступ – 0,6 см, ориентация страницы – книжная.

6. Объем текста – от 10000 знаков, включая пробелы, иллюстрационный материал – до 6 рисунков.

7. Статьи должны быть структурированы и выполнены по международному стандарту IMRAD. Структура статьи: индекс УДК, название статьи, фамилия, имя, отчество авторов, название учреждения, где выполнена работа, аннотация и ключевые слова на языке оригинала



(русском / китайском / монгольском) и английском языках, введение, цель исследования, материал и методы исследования, результаты исследования и их обсуждение, выводы или заключение, библиографический список и references, критерии авторства, конфликт интересов и сведения об авторах (вся информация предоставляется одним файлом, названным следующим образом: *Фамилия первого автора – Первые три-четыре слова названия.doc*).

8. Рекомендуемая длина названия статьи – до 100 знаков с пробелами. Название статьи должно быть лишено сокращений, аббревиатур, описывать содержание статьи точно и конкретно, при этом оно должно быть достаточно длинным, чтобы однозначно выразить главную идею статьи, и коротким настолько, чтобы ни одно слово нельзя было выбросить без потери смысла.

9. Аннотация должна отражать основную идею статьи, поскольку для большинства читателей она является главным источником информации о представленном исследовании. Объем аннотации – 1500–2000 знаков, примерная структура: цель, методы, предмет, объект и результаты исследования, выводы. Не следует ссылаться на таблицы и / или рисунки, приведенные в основном в тексте статьи, а также использованную литературу, поскольку аннотации также публикуются отдельно от статьи. Не используйте в аннотации сокращения, аббревиатуры, а также формулы, так как аннотации в большинстве баз данных, начиная с РИНЦ, публикуются в формате, исключающем отображение формул.

Ключевые слова должны отражать суть исследования, способствовать работе поисковых систем, по количеству не превышать 10 единиц, словосочетания – не более 3 единиц.

10. Формулы в тексте должны быть набраны в специальном редакторе формул Microsoft Word посредством опции «вставка» – «уравнение». Все экспликации элементов формул необходимо также выполнять в редакторе формул.

11. Таблицы должны содержать только необходимые данные и представлять собой обобщенные и статистически обработанные материалы с указанием обозначения переменных. Каждая таблица снабжается заголовком. Формат таблиц – книжный, направление шрифта – по горизонтали.

12. Графические материалы к статье (рисунки и фотографии) представляются в минимальном количестве (не более 6 единиц) и должны быть выполнены в соответствии с требованиями к геологической графике. Выбирается масштаб, пригодный для тиражирования, а размер – не более 170×245 мм. Графические материалы должны допускать перемещение в тексте и возможность изменения размеров. Каждый рисунок сопровождается надписями в содержательной части и подрисуночной подписью, в которой представляется объяснение всех его элементов. Названия рисунков и подрисуночные подписи должны быть максимально краткие, основная информация предоставляется в тексте.

Все надписи на рисунках должны быть редактируемыми и выполненными 8 кеглем шрифта Arial (основной) на языке текста статьи. В некоторых случаях размер шрифта может быть уменьшен до 5-6 pt. Буквенная нумерация рисунков выполняется 10 кеглем шрифта Arial (полужирный курсив) на английском языке. Помимо представления в тексте статьи рисунки должны быть дополнительно предоставлены отдельными файлами. Векторная графика дополнительно предоставляется в форматах .cdr, .ai с возможностью редактирования, при экспорте из других программ следует использовать формат PostScript (.eps) с разрешением 300 dpi. Фотографии, сканированные материалы представляются в формате TIFF или PNG / JPEG (сохранение в формате PNG / JPEG необходимо производить в максимально высоком качестве). Разрешение растровой графики должно составлять не менее 600 dpi для черно-белых рисунков и не менее 300 dpi для фотографий. Схемы, графики, диаграммы предоставляются с расширением .xls (MS Excel).

13. Ссылки на литературные источники приводятся в квадратных скобках в порядке возрастания. Библиографический список формируется по мере упоминания источников в тексте.



Рекомендуемое количество источников в библиографическом списке – не менее 20, при этом минимум 50 % списка рекомендуется занимать материалами, вышедшими в течение последних 5 лет, в том числе не менее 5 источников должны составлять статьи из иностранных журналов. Самоцитирование автора не должно превышать 25 % от общего количества источников, самоцитирование журнала полностью исключается.

В списке литературы допускаются ссылки на статьи из научных журналов, из сборников материалов научных конференций, из неперiodических сборников научных статей, на книги, посвященные научным исследованиям, а также авторские патенты. Редакционная коллегия рекомендует в списке литературы ссылаться на статьи из журналов, входящих в базы данных по глобальным индексам цитирования (Scopus, Web of Science и другие).

Не допускаются ссылки на нормативные правовые акты (законы, кодексы, указы, положения и пр.), учебные издания (учебники, учебные пособия, конспекты лекций, методические указания и т. д.), справочные издания (справочники, словари и энциклопедии), диссертации и авторефераты, геологические карты, а также страницы электронных ресурсов, не имеющие конкретного авторства. При необходимости обращения к этим источникам ссылку на них следует размещать в подстрочной сноске.

14. Список литературы составляется в двух вариантах. Первый вариант (список источников) оформляется на языке источника в соответствии с ГОСТ Р 7.0.5 2008. Второй вариант (references) оформляется в виде транслитерации русского текста в латиницу с переводом на английский язык и служит для отслеживания цитируемости авторов. Примеры оформления источников в списках можно посмотреть на нашем сайте в разделе «Требования к статьям».

15. При подаче статьи авторами предоставляются на английском языке следующие элементы работы: название статьи, сведения об авторах, аннотация, ключевые слова, благодарности, названия таблиц и подрисуночные подписи, библиография.

16. Авторы статей должны придерживаться обязанностей, предусмотренных «Редакционной политикой журнала».

17. Редакция оставляет за собой право отклонять статьи, не отвечающие указанным требованиям. Поступающие в редакцию материалы возврату не подлежат.

18. Редакция оставляет за собой право на научное и литературное редактирование статей с последующим согласованием с авторами.

19. Представленные статьи проходят проверку на наличие заимствований.

20. Журнал выпускается с периодичностью 4 номера в год.

Внимание! Публикация статей является бесплатной.

Мы приглашаем Вас к участию в нашем проекте в качестве авторов, рекламодателей и читателей.

По вопросам публикации обращаться по адресу: 664074, Россия, г. Иркутск, ул. Лермонтова, 83, Иркутский национальный исследовательский технический университет, редколлегия, ауд. Е-317.

Главный редактор Раиса Моисеевна Лобацкая, тел.: +7 (3952) 405115, e-mail: lobatskaya@gmail.com.

Заместитель главного редактора Лариса Ивановна Аузина, тел.: +7 (3952) 405108, e-mail: lauzina@mail.ru.

Статьи следует направлять ответственному секретарю Марии Николаевне Долгих через личный кабинет на сайте www.nznj.ru или по электронной почте nzn@istu.edu; тел.: +7 (3952) 405108, адрес: 664074, Россия, г. Иркутск, ул. Лермонтова, 83, ауд. Е-219.



Образец оформления статьи

УДК 549.09

Минералого-технологические типы руд Томинского месторождения меди (Южный Урал)

Е.М. Курчевская^a, М.В. Яхно^b, А.Е. Сенченко^c^{a,c}НИИПИ «Технологии обогащения минерального сырья», г. Иркутск, Россия^bИркутский национальный исследовательский технический университет, г. Иркутск, Россия

Резюме: Цель. Цель данного исследования заключается в изучении технологических типов руд Томинского месторождения меди, а также минерального состава вмещающих пород и руд каждого из трех типов, выявлении минералогических и структурно-текстурных особенностей руд, выявлении взаимосвязи изменения рудной минерализации и степени метаморфизма для каждого типа руд. **Методы.** Рудные тела Томинского медно-порфирового месторождения, залегающие в диоритах и кварцевых диоритах, представляют собой прожилковые и прожилково-вкрапленные скопления в зонах дробления. На месторождении широко развиты метасоматиты кварц-серицитовый формации. Изучение типов руд проводилось с использованием микроскопов. **Результаты.** В результате выделено три геолого-технологических типа руд в пределах Томинского месторождения. Первый тип представлен первичными сульфидными рудами, которые наблюдаются в среднем ниже глубины 50–55 м. По составу это хлорит-мусковит-кварцевые метасоматиты. Вмещающие породы представлены серицитизированными, хлоритизированными и карбонатизированными диоритами. В составе руд преобладают халькопирит и пирит. Практически вся медь содержится в халькопирите. Второй тип – это рудные зоны вторичного сульфидного обогащения. Этот тип сложен первичными и вторичными сульфидами меди. Все породы аргиллизированные и представлены метасоматитами различного состава. Все виды пород несут в себе рудную минерализацию. К третьему типу относятся окисленные руды, которые образуют зону окисления месторождения. Они делятся на три подтипа: глинистые, глинисто-щебнистые и щебнистые руды. Глинистые руды залегают в самых верхних частях коры выветривания, глинисто-щебнистые руды слагают центральную ее часть, а руды в щебнистых образованиях отмечены в нижних горизонтах. Представлено петрографическое описание каждого из типов. Выявлены минералогические и структурно-текстурные особенности руд. В результате изучения петрографического состава каждого типа руд установлена различная степень метаморфизма и вследствие этого – изменение рудной минерализации. **Выводы.** Прослеживается влияние метасоматических процессов, изменивших строение и минеральный состав руд. Для первого типа руды характерно наличие первичных пород – диоритов с насыщенной сульфидной вкрапленностью и с незначительными метасоматическими изменениями. В зоне вторичного обогащения породы претерпели интенсивное метасоматическое изменение. Породы этой зоны насыщены гидроксидами железа. Для зоны интенсивного выветривания характерны глинистые и хлоритизированные породы. Рудная минерализация представлена исключительно окисленными минералами. Сульфиды единичны. Различия в минеральном составе трех типов руд влияют на выбор способов переработки руды в пределах Томинского месторождения.

Ключевые слова: Томинское месторождение, медно-порфировое оруденение, метаморфизм, технологические типы руд

Финансирование:**Благодарности:**

Mineralogical and technological types of Tominskoye deposit copper ores (Southern Ural)

Elena M. Kurchevskaya^a, Marina V. Yakhno^b, Arkady Y. Senchenko^c^{a,c}NIPI TOMS (Scientific Research and Design Institute "Technologies of Minerals Separation"), Irkutsk, Russia^bIrkutsk National Research Technical University, Irkutsk, Russia

Abstract. Purpose. The purpose of the article is investigation of the technological types of Tominskoye copper deposit ores; examination of the mineral composition of the host rocks and ores of each of the three types; identification of mineralogical and structural-textural features of ores, research of the relationship of mineralization and metamorphism intensity alteration for each type of ore. **Methods.** Ore bodies of the Tominskoye porphyry copper deposit occurring in the diorites and quartz diorites are veinlet and porphyry-stringer clusters in crush zones. The deposit is characterized with the predominant metasomatic rocks of quartz-sericite formation. **Results.** Three geological and technological ore types are distinguished within the Tominskoye field. The first type is represented by primary sulfide ores, which occur on average lower than 50–55 m depth. By composition they are chlorite-muscovite-quartz metasomatic rocks. The host rocks are represented by sericitized, chloritized and carbonated diorites. Chalcopyrite and pyrite are predominant elements in ore composition. Chalcopyrite contains carbonated diorites. Chalcopyrite and pyrite are predominant elements in ore composition.



Chalcopyrite contains almost all of the copper. The second type includes the ore zones of secondary sulfide concentration. This type is composed of primary and secondary copper sulfides. All the rocks are dirty argillaceous and are represented by metasomatic rocks of different composition. All types of rocks feature ore mineralization. The third type covers oxidized ores, which form the oxidation zone of the deposit. They are divided into three subtypes: clay, claydetrital and detrital ores. Clay ores occur in the uppermost parts of the crust of weathering. Clay-detrital ores compose its central part, while ores in detrital formations have been found in the lower horizons. Each of the type is given a petrographic description. Mineralogical and structural-textural features of ores are identified. The study of the petrographic composition of each type of ores showed a varying degree of metamorphism that resulted in changes in ore mineralization. **Conclusions.** The influence of metasomatic processes is indicated. The last have changed the structure and mineral composition of ores. The presence of primary rocks – diorites with saturated sulfide impregnation and insignificant metasomatic alterations is typical for the first type of ore. The rocks in the zone of secondary concentration have undergone intense metasomatic alteration. These rocks are saturated with iron hydroxides. The presence of clay and chloritized rocks characterize the zone of intense weathering. Ore mineralization is represented exclusively by oxidized minerals. Sulfides are rare. Variations in the mineral composition of the three types of ores influence the choice of ore processing methods at Tominskoye ore deposit.

Keywords: Tominskoye field, porphyry copper mineralization, metamorphism, technological ore types

Funding:

Acknowledgements:

Далее идут **текст статьи** (в виде: введение, цель исследования, материалы и методы исследования, результаты исследования и их обсуждение, заключение), **список источников** (references), **вклад авторов** (contribution of the authors) и **конфликт интересов** (conflict of interests).

Информация об авторах / Information about the authors

Портретное
фото автора
(4×4 см)

Курчевская Елена Михайловна,

старший научный сотрудник,
НИИПИ «Технологии обогащения минерального сырья»,
г. Иркутск, Россия,
kurchevskaya@tomsgroup.ru
ORCID

Elena M. Kurchevskaya,

Senior Researcher,
Scientific Research and Design Institute “Technologies of Minerals Separation”,
Irkutsk, Russia,
kurchevskaya@tomsgroup.ru
ORCID

Портретное
фото автора
(4×4 см)

Яхно Марина Владиславовна,

старший преподаватель кафедры геологии и геохимии полезных ископаемых,
Иркутский национальный исследовательский технический университет,
г. Иркутск, Россия,
✉ ymar@istu.edu
ORCID

Marina V. Yakhno,

Senior Lecturer of the Department of Geology and Geochemistry of Minerals,
Irkutsk National Research Technical University,
Irkutsk, Russia,
✉ ymar@istu.edu
ORCID

Портретное
фото автора
(4×4 см)

Сенченко Аркадий Евгеньевич,

генеральный директор,
НИИПИ «Технологии обогащения минерального сырья»,
г. Иркутск, Россия,
senchenko@tomsgroup.ru
ORCID

Arkady E. Senchenko,

CEO,
Scientific Research and Design Institute “Technologies of Minerals Separation”,
Irkutsk, Russia,
senchenko@tomsgroup.ru
ORCID

НАУКИ О ЗЕМЛЕ И НЕДРОПОЛЬЗОВАНИЕ

12+

Научный журнал

Том 46 № 1 (82) 2023

Дизайнер А.А. Хохряков
Редактор Ф.А. Посысоева
Перевод на английский язык В.В. Батицкой
Компьютерная верстка Ф.А. Посысоевой

Издание распространяется бесплатно

Выход в свет 30.03.2023 г. Формат 60×90/8.
Бумага офсетная. Печать цифровая. Усл. печ. л. 18,25.
Тираж 500 экз. Зак. 20. Поз. плана 4н

Отпечатано в типографии Издательства
ФГБОУ ВО «Иркутский национальный
исследовательский технический университет»,
адрес типографии: 664074, Россия, г. Иркутск, ул. Лермонтова, 83а

Адрес редакции, учредителя и издателя:
ФГБОУ ВО «Иркутский национальный
исследовательский технический университет»,
664074, Россия, г. Иркутск, ул. Лермонтова, 83