

ISSN 2686-9993 (print)

ISSN 2686-7931 (online)

12+

НАУКИ О ЗЕМЛЕ И НЕДРОПОЛЬЗОВАНИЕ

Том
Vol. 45 № 3 2022

EARTH SCIENCES AND SUBSOIL USE

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

НАУКИ О ЗЕМЛЕ И НЕДРОПОЛЬЗОВАНИЕ

Том
Vol.

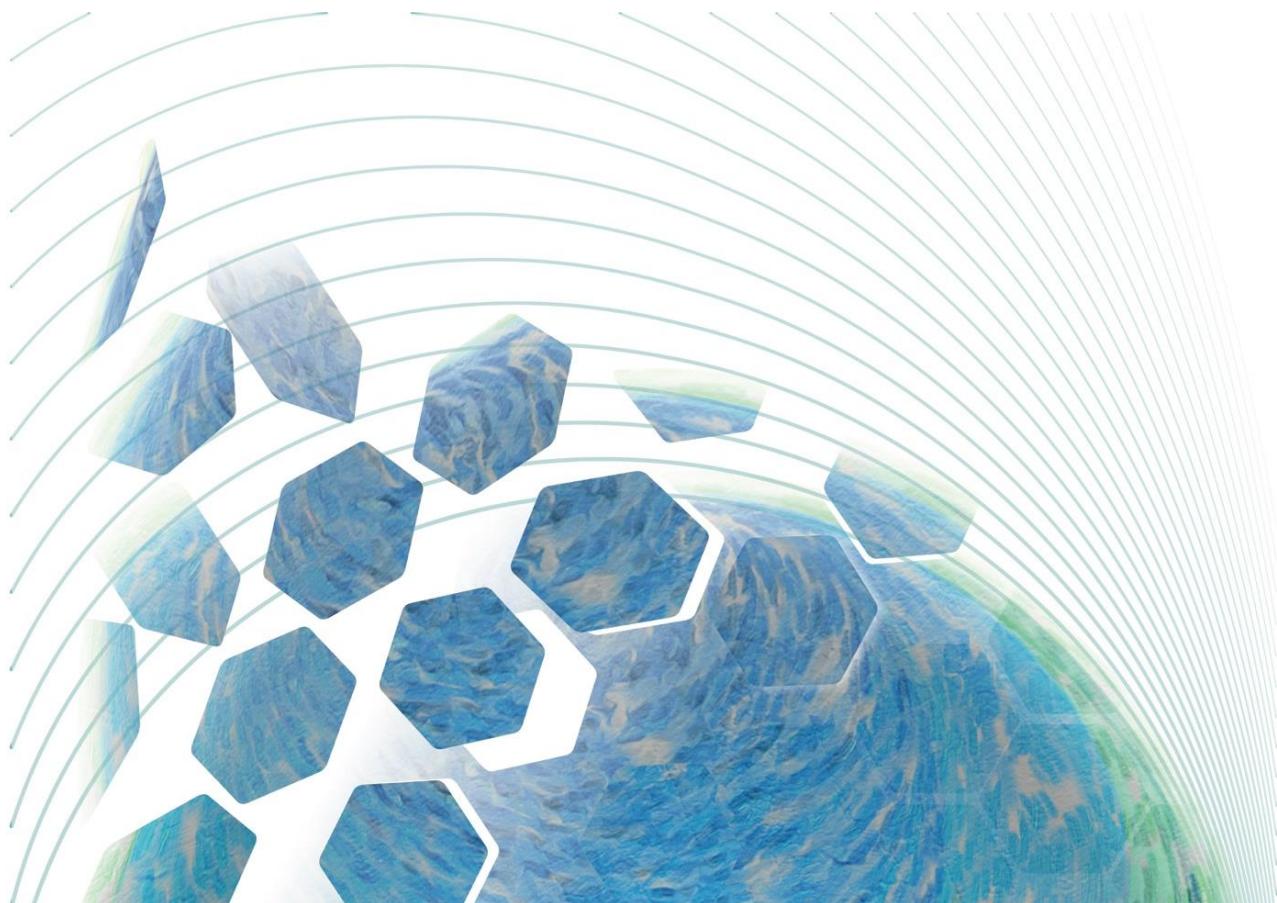
45

№ 3

2022

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)
Скляров 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)
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)
Корняков М. В., д-р техн. наук, доцент, ректор, Иркутский национальный исследовательский технический университет (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, рассыпается в Российскую книжную палату, ВИНИТИ РАН. Журнал включен в научную электронную библиотеку CyberLeninka, в базы данных открытого доступа DOAJ, OAII, 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:
ПИ № 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», 2022

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)

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)

Kornyakov M. V., Dr. Sci. (Eng.), Rector, Irkutsk National Research Technical University (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, OAII (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", 2022



СОДЕРЖАНИЕ

Содержание.....	220
Геология, поиски и разведка месторождений полезных ископаемых	
Дорош Е. А., Тальгамер Б. Л. Анализ минерально-сырьевой базы золотодобычи в Ленском золотоносном районе и обоснование направлений развития способов разработки россыпей.....	222
Мальцева Г. Д., Яхно М. В., Иванова Р. Н., Буруева Г. Н. Стадийность образования рудных минералов участка Средний Многовершинного месторождения.....	235
Вахромеев А. Г., Корнилова Т. А., Мисюркеева Н. В., Уренко Р. С., Станевич А. М., Степанова Н. И., Пуляевский М. С. Биогермы Божеханского поднятия Предбайкальского прогиба – краевой барьерно-рифовой системы кембрийского соленосного бассейна юга Сибирской платформы.....	246
Сорокина В. Е., Константинова М. В. Получение имитаций самородков золота с использованием медных сплавов.....	265
Геоэкология	
Кулаков В. В., Пасичников В. Э. Геоэкологические условия Хабаровской агломерации для размещения строительных отходов.....	275
Разведка и разработка месторождений полезных ископаемых	
Ламбин А. И. Показатели эффективности удаления шлама при бурении наклонно направленных скважин.....	285
Хрунина Н. П. Влияние гидродинамических эффектов на структурные изменения дисперсоида в процессе микродезинтеграции.....	294
Нуриев А. А., Султанов Ш. Х. Применение коэффициента вдавливания проппанта в дизайне гидравлического разрыва пласта для нефтематеринских пород.....	305
К сведению авторов.....	313



CONTENTS

Contents.....	221
---------------	-----

Geology, Prospecting and Exploration of Mineral Deposits

Dorosh E. A., Talgamer B. L. Analysis of the mineral resource base of gold mining in the Lena gold-bearing district and substantiation of the development directions of placer mining methods.....	222
Maltseva G. D., Yakhno M. V., Ivanova R. N., Burueva G. N. Ore mineral formation stages of the Sredniy site (Mnogovershinoye deposit).....	235
Vakhromeev A. G., Kornilova T. A., Misurkeeva N. V., Urenko R. S., Stanevich A. M., Stepanova N. I., Pulyaevskiy M. S. Bioherms of the Bozhekhan uplift in the Cis-Baikal trough as a marginal barrier reef system of a Cambrian salt basin of the southern Siberian platform.....	246
Sorokina V. E., Konstantinova M. V. Producing gold nugget simulants using copper alloys.....	265

Geoecology

Kulakov V. V., Pasichnikov V. E. Geoecological conditions of the Khabarovsk agglomeration for construction waste disposal.....	275
--	-----

Exploration and Development of Mineral Deposits

Lambin A. I. Indicators of cutting removal efficiency when drilling directional wells.....	285
Khrunina N. P. Influence of hydrodynamic effects on dispersoid structural changes under microdisintegration.....	294
Nuriev A. A., Sultanov Sh. Kh. Using proppant indentation coefficient in design of hydraulic fracturing treatment of oil source rocks.....	305
Information for the Authors.....	313



ГЕОЛОГИЯ, ПОИСКИ И РАЗВЕДКА МЕСТОРОЖДЕНИЙ ПОЛЕЗНЫХ ИСКОПАЕМЫХ

Научная статья

УДК 553.411+553.068.5+622.271.1

<https://doi.org/10.21285/2686-9993-2022-45-3-222-234>



Анализ минерально-сырьевой базы золотодобычи в Ленском золотоносном районе и обоснование направлений развития способов разработки россыпей

Егор Алексеевич Дорош^a, Борис Леонидович Тальгамер^b

^a*ООО «СибЗолото» г. Иркутск, Россия*

^b*Иркутский национальный исследовательский технический университет, г. Иркутск, Россия*

Автор, ответственный за переписку: Дорош Егор Алексеевич, egordoros3@gmail.com

Резюме. Развитие золотодобывающей отрасли связано в первую очередь с наращиванием минерально-сырьевой базы, освоением перспективных месторождений, повышением качества сырья. Вместе с тем на протяжении многих лет специалистами отмечается ухудшение качества запасов россыпного золота как в России в целом, так и в Восточной Сибири в частности. В связи с этим целью настоящего исследования был выбран анализ динамики минерально-сырьевой базы золотодобычи в Ленском золотоносном районе, а также обоснование направления развития технологии разработки россыпей. В ходе работы проведена оценка состояния минерально-сырьевой базы золотодобывающей промышленности Иркутской области в период с 2000 по 2021 г., составлена количественная и качественная характеристика запасов россыпного золота, определены ключевые изменения, произошедшие в эксплуатации россыпей за последние 20 лет. При этом обозначена динамика ухудшения качества запасов россыпного золота и указаны причины этого ухудшения за анализируемый период. Кроме того, дана краткая характеристика основных горнотехнических показателей отработанных за последнее время крупных и средних месторождений россыпного золота и представлена структура распределения запасов в техногенных месторождениях. В заключении сформулированы выводы по итогам проделанной работы, а также озвучены актуальные проблемы современной россыпной золотодобычи, оценены ее перспективы в Иркутской области. Представлены возможности пополнения минерально-сырьевой базы за счет вовлечения в разработку техногенных запасов.

Ключевые слова: золотодобывающая промышленность, россыпные месторождения, минерально-сырьевая база, горнотехнические параметры, техногенные месторождения, проблемы россыпной золотодобычи

Для цитирования: Дорош Е. А., Тальгамер Б. Л. Анализ минерально-сырьевой базы золотодобычи в Ленском золотоносном районе и обоснование направлений развития способов разработки россыпей // Науки о Земле и недропользование. 2022. Т. 45. № 3. С. 222–234. <https://doi.org/10.21285/2686-9993-2022-45-3-222-234>.

GEOLOGY, PROSPECTING AND EXPLORATION OF MINERAL DEPOSITS

Original article

Analysis of the mineral resource base of gold mining in the Lena gold-bearing district and substantiation of the development directions of placer mining methods

Egor A. Dorosh^a, Boris L. Talgamer^b

^a*SibZoloto LLC, Irkutsk, Russia*

^b*Irkutsk National Research Technical University, Irkutsk, Russia*

Corresponding author: Egor A. Dorosh, egordoros3@gmail.com

Abstract. Development of the gold mining industry is in the first place associated with an increase in the mineral resource base, development of promising deposits and improvement in the quality of raw materials. At the same time, experts have

© Дорош Е. А., Тальгамер Б. Л., 2022



been noting a deterioration in the quality of alluvial gold reserves over the last years both in Russia as a whole and in Eastern Siberia in particular. Therefore, the purpose of this research is to analyze the dynamics of the mineral resource base of gold mining in the Lena gold-bearing area as well as to substantiate the development trends of the placer development technology. The assessment was given to the state of the mineral resource base of the gold mining industry of the Irkutsk region in the period from 2000 to 2021. A quantitative and qualitative characteristic of alluvial gold reserves was provided with identified key changes caused by placer mining over the past 20 years. Having indicated the deterioration dynamics in the quality of alluvial gold reserves, the authors specified its reasons for the period under analysis. In addition, a brief description of the main mining and engineering indicators of the large and medium-sized alluvial gold deposits worked out in recent years is given. The distribution structure of reserves in technogenic deposits is presented. The conclusions are formulated on the results of the research performed, relevant problems of modern placer gold mining are formulated and the prospects of placer mining in the Irkutsk region are assessed. The replenishing possibilities of the mineral resource base by involving technogenic reserves in the development are described.

Keywords: gold mining industry, placer deposits, mineral resource base, mining-engineering parameters, technogenic deposits, problems of alluvial gold mining

For citation: Dorosh E. A., Talgamer B. L. Analysis of the mineral resource base of gold mining in the Lena gold-bearing district and substantiation of the development directions of placer mining methods. *Nauki o Zemle i nedropol'zovanie = Earth sciences and subsoil use*. 2022;45(3):222-234. (In Russ.). <https://doi.org/10.21285/2686-9993-2022-45-3-222-234>.

Введение

Иркутская область является одним из наиболее богатых регионов не только в России, но и во всем мире по запасам золота, которое добывается здесь с 1840-х гг.¹. Государственным балансом на территории Иркутской области по состоянию на 1 января 2021 г. учитывается 395 месторождений золота с балансовыми запасами категорий А+В+С₁ в количестве 1641 т, категории С₂ – 971 т и забалансовыми запасами – 860 т². Область занимает первое место по прогнозным ресурсам категории Р₁, количество которых составляет 1597 т или 29 % прогнозных ресурсов России [1].

Основа минерально-сырьевой базы представлена коренными золоторудными месторождениями. В 28 коренных месторождениях золота запасы категорий А+В+С₁ насчитывают 1572 т (95,8 % от запасов области), категории С₂ – 925 т, забалансовые запасы – 830 т³.

По балансовым запасам россыпного золота Иркутская область находится в числе лидеров среди регионов Российской Федерации. В 366 россыпных месторождениях золота сосредоточено 69,3 т запасов категорий А+В+С₁ (4,2 % от запасов области), 39,4 т запасов категории С₂ и 30,9 т забалансовых запасов⁴.

Уровень добычи золота из коренных месторождений стабильно увеличивается – данная тенденция отражена на графиках, представленных на рис. 1. Если в 1999 г. добыча золота из коренных месторождений не осуществлялась, то в последний отчетный период (2020 г.) было извлечено 20,3 т золота (65,7 %). Добыча золота из россыпных месторождений за этот период находилась на уровне 12,8–10,6 т (в 1999 и 2020 г. соответственно)⁵.

Материалы и методы исследования

В ходе исследования были рассмотрены возможности пополнения минерально-сырьевой базы россыпной золотодобычи в Ленском золотоносном районе и обосновано направление развития способов разработки россыпей. При написании работы были использованы материалы Сибирского отделения ФГБУ «Росгеофонд» и данные об эксплуатации россыпей в объединении «Лензолото». На основе указанных материалов проведен анализ динамики объемов и качества запасов, а также горнотехнических условий их залегания, способов и технологий разработки россыпей за последние 20 лет.

¹ Лешков В. Г. Разработка россыпных месторождений: учебник для вузов. М.: Горная книга – Изд-во МГГУ, 2007. 906 с.

² Государственный баланс запасов полезных ископаемых Российской Федерации на 1 января 2021 года. Вып. 29. Золото. Т. 7. Сибирский Федеральный округ. Ч. 6. Иркутская область. М., 2021. 268 с. Инв. № 2655Б.

³ Там же.

⁴ Там же.

⁵ Там же.

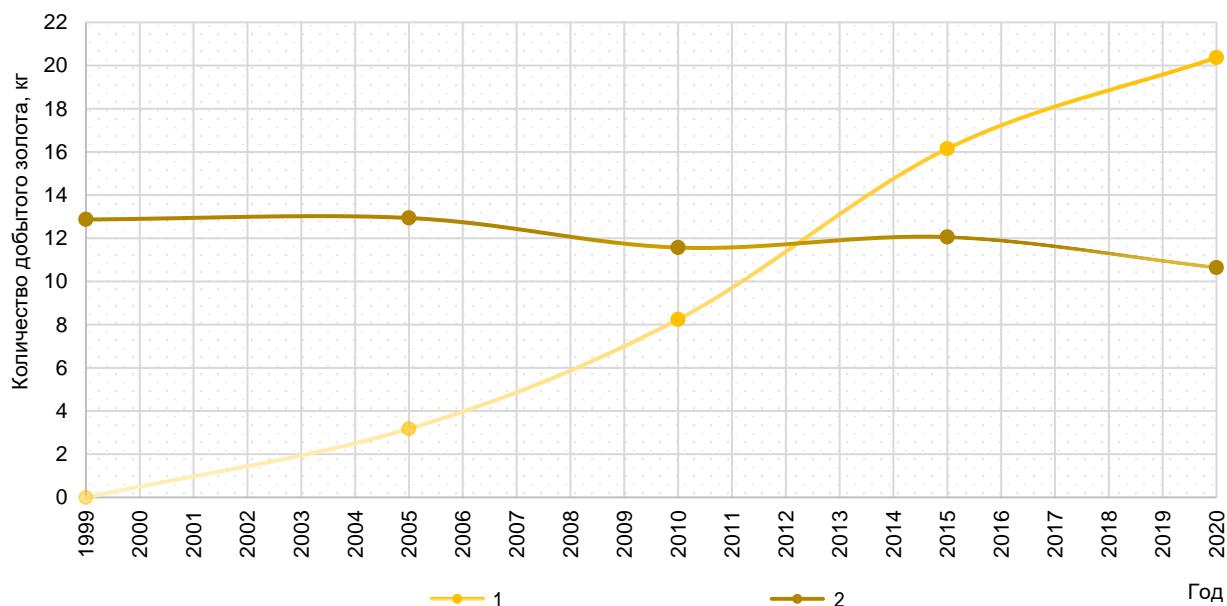


Рис. 1. Динамика добычи золота из коренных и россыпных месторождений в Иркутской области за 21 год (период с 1999 по 2020 г.):

1 – добыча из коренных месторождений; 2 – добыча из россыпных месторождений

Fig. 1. Dynamics of gold mining from primary and alluvial deposits

in the Irkutsk region for 21 years (1999–2020):

1 – primary gold mining; 2 – placer mining

Результаты исследования и их обсуждение

Пик россыпной золотодобычи в Иркутской области пришелся на 1960–1980 гг. и был связан с внедрением, развитием и широким применением дражного способа разработки. В начале 1970-х гг. драгами добывалось почти три четверти золота (73 %) [2]. На современном этапе золотодобычи большая часть запасов россыпного золота Иркутской области отрабатывается открытым раздельным способом (86 %) [3]. Подземный и гидравлический способы разработки россыпей в нашем регионе в настоящее время практически не используются.

Для анализа структуры минерально-сырьевой базы россыпного золота с использованием данных государственных балансов запа-

сов полезных ископаемых Иркутской области по золоту^{6–10} построены графики, отображенные на рис. 2–4.

Из представленного на рис. 2 графика следует, что за анализируемый период доля детально разведенных запасов категорий А+В+C₁ уменьшилась для дражного способа на 23,9 %, для гидравлического способа на 94,7 %, для открытого – на 34,5 %, для подземного – на 20,1 %. Данный факт связан с тем, что «срабатывание» высококатегорийных запасов существенно опережает их прирост. Происходит это по многим причинам, основными из которых являются естественное ухудшение минерально-сырьевой базы и отсутствие финансирования геолого-разведочных работ государством.

⁶ Государственный баланс запасов полезных ископаемых Российской Федерации на 1 января 2021 года. Вып. 29. Золото. Т. 7. Сибирский Федеральный округ. Ч. 6. Иркутская область. М., 2021. 268 с. Инв. № 2655Б.

⁷ Государственный баланс запасов полезных ископаемых Российской Федерации на 1 января 2000 года. Вып. 72. Золото. Т. 3. Восточно-Сибирский регион. Иркутская область. М., 2000. 181 с. Инв. № 728Б.

⁸ Государственный баланс запасов полезных ископаемых Российской Федерации на 1 января 2006 года. Вып. 29. Золото. Т. 6. Сибирский Федеральный округ. Ч. 6. Иркутская область. М., 2006. 206 с. Инв. № 1875Б.

⁹ Государственный баланс запасов полезных ископаемых Российской Федерации на 1 января 2011 года. Вып. 29. Золото. Т. 6. Сибирский Федеральный округ. Ч. 6. Иркутская область. М., 2011. 218 с. Инв. № 2118Б.

¹⁰ Государственный баланс запасов полезных ископаемых Российской Федерации на 1 января 2016 года. Вып. 29. Золото. Т. 7. Сибирский Федеральный округ. Ч. 6. Иркутская область. М., 2011. 328 с. Инв. № 2381Б.

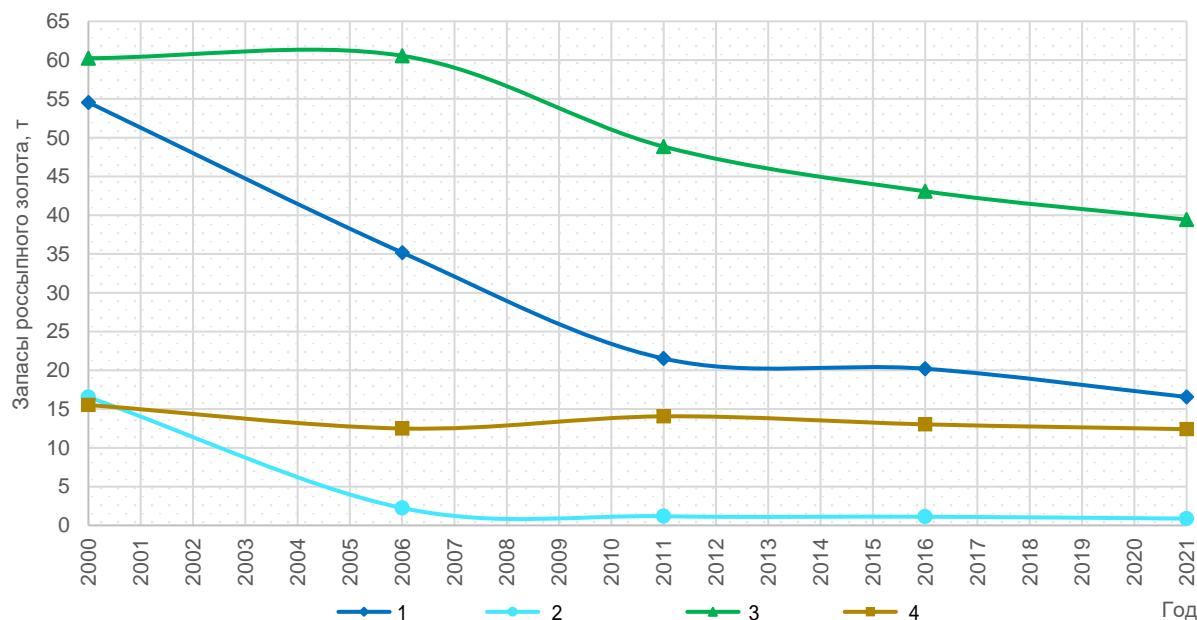


Рис. 2. Движение запасов россыпного золота категорий А+В+С₁ Иркутской области для различных способов добычи в период с 2000 по 2021 г.:
1 – дражный; 2 – гидравлический; 3 – открытый; 4 – подземный

Fig. 2. Movement of alluvial gold reserves of A+B+C₁ categories in the Irkutsk region for various mining methods for the period from 2000 to 2021:
1 – drag; 2 – hydraulic; 3 – open; 4 – underground

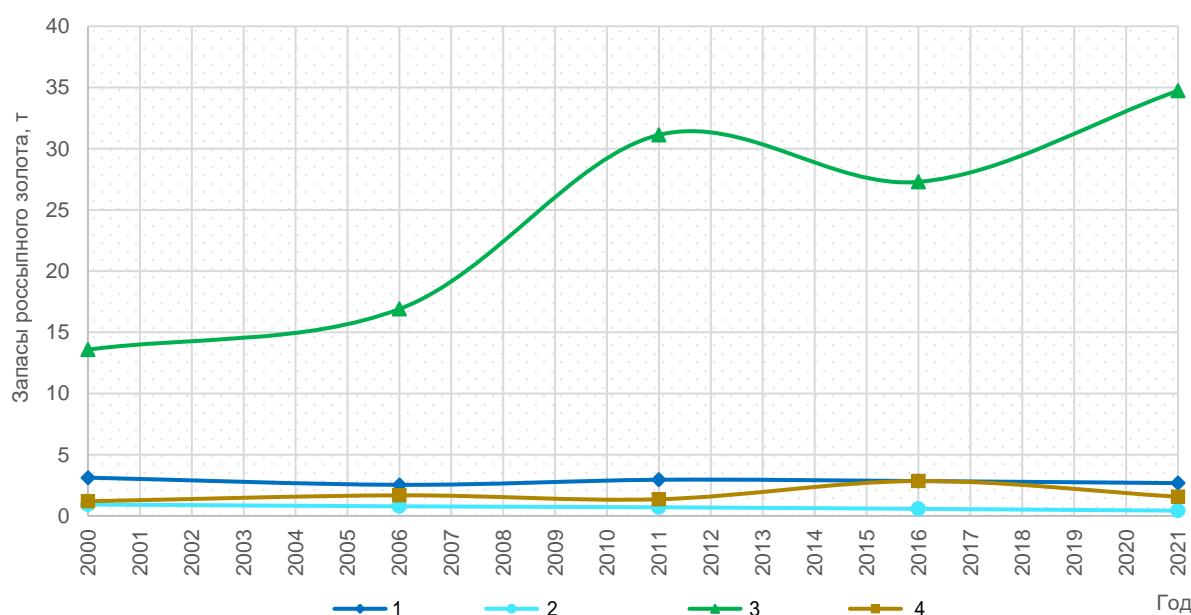


Рис. 3. Движение запасов россыпного золота категории С₂ Иркутской области для различных способов добычи в период с 2000 по 2021 г.:
1 – дражный; 2 – гидравлический; 3 – открытый; 4 – подземный

Fig. 3. Movement of alluvial gold reserves of C₂ category in the Irkutsk region for various mining methods for the period from 2000 to 2021:
1 – drag; 2 – hydraulic; 3 – open; 4 – underground

В свою очередь, из рис. 3 следует, что для низкокатегорийных запасов категории С₂ для дражного, гидравлического и подземного способов за этот период значительно не изме-

нилась. Из общего ряда выбивается открытый раздельный способ, запасы для которого по данной категории за представленный период выросли на 155 % и составляют на сегодняш-

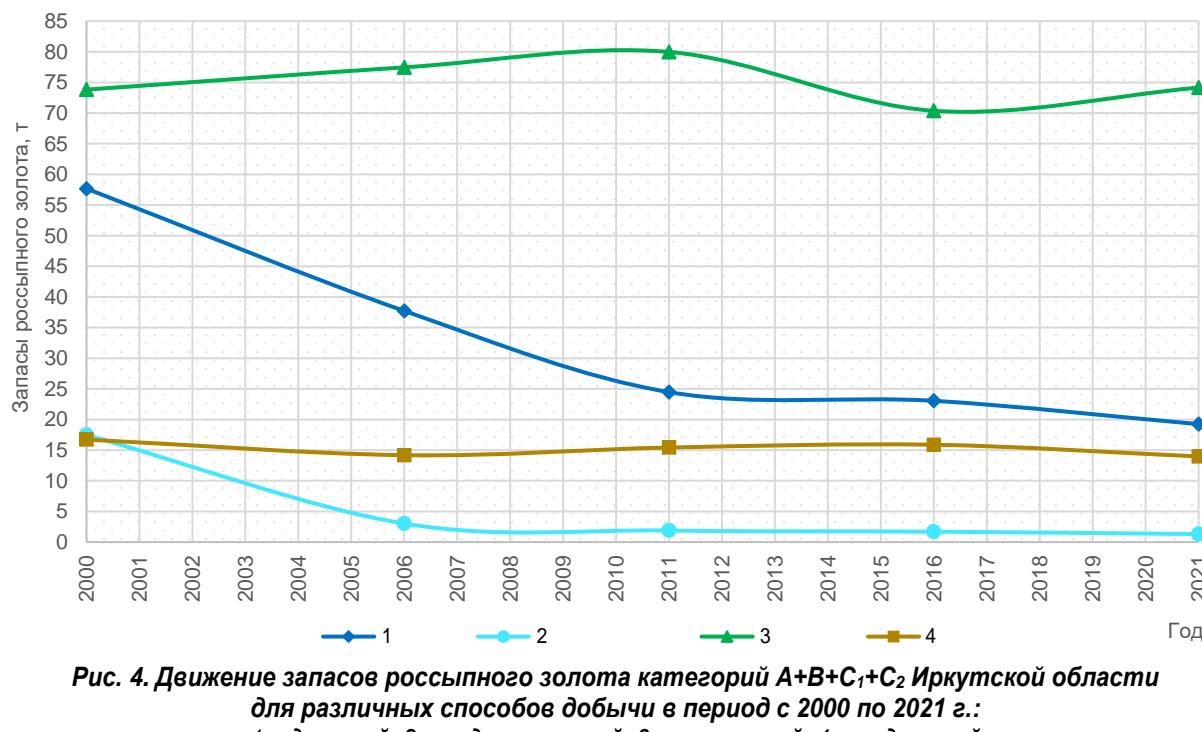


Рис. 4. Движение запасов россыпного золота категорий А+В+C₁+C₂ Иркутской области для различных способов добычи в период с 2000 по 2021 г.:

1 – дражный; 2 – гидравлический; 3 – открытый; 4 – подземный

Fig. 4. Movement of alluvial gold reserves of A+B+C₁+C₂ categories in the Irkutsk region for various mining methods for the period from 2000 to 2021:

1 – drag; 2 – hydraulic; 3 – open; 4 – underground

ний день 34,7 т (88 %). Связано это в первую очередь с тем, что большая часть россыпного золота добывается открытым раздельным способом, соответственно, и большая часть приращиваемых запасов приходится на этот способ. Как правило, новые месторождения по сложности геологического строения (в соответствии с приказом Министерства природных ресурсов РФ № 278¹¹) относятся к третьей и четвертой категориям. Особенности строения месторождений этих категорий определяют возможность выявления в процессе разведки запасов категорий C₁ и C₂ для третьей категории и C₂ для четвертой категории.

Из рис. 4 видно, что доля запасов россыпного золота категорий А+В+C₁+C₂ постепенно уменьшается для дражного (на 66,6 %) и гидравлического (на 92,8 %) способов добычи, а для открытого и поземного способов находится на одном уровне. Уменьшение доли дражных запасов связано в первую очередь с их отработкой. Также наблюдаются тенденции к переоценке запасов для гидравличес-

ского и дражного способов добычи с переводом их в разработку открытым раздельным способом. Запасы для подземного способа за представленный период значительных изменений не претерпели ввиду трудоемкости их освоения. Запасы для открытого раздельного способа за представленный период находятся примерно на одном уровне, сохраняя «здоровый» баланс между добычей и приростом. Уровень «срабатывания» запасов сопоставим с уровнем их прироста, и происходит это в основном за счет низкокатегорийных запасов категории C₂ (46,8 %).

Горнотехнические условия россыпных месторождений Ленского золотоносного района не являются благоприятными. Особо тяжелыми условиями разработки отличаются многолетнемерзлые, валунистые, труднопромывистые глинистые россыпи, а также россыпи с большой глубиной залегания запасов (погребенные россыпи), сильно обводненные и содержащие мелкое и тонкое золото.

¹¹ Об утверждении Классификации запасов и прогнозных ресурсов твердых полезных ископаемых: приказ Министерства природных ресурсов РФ от 11 декабря 2006 г. № 278 // Гарант: информационно-правовой портал [Электронный ресурс]. URL: <https://base.garant.ru/12151221/> (20.01.2022).



Наличие в разрабатываемых породах многолетней мерзлоты весьма негативно влияет на все производственные процессы. Сведения, отражающие пораженность запасов многолетней мерзлотой, приведены в табл. 1.

Из табл. 1 следует, что большая часть запасов в Бодайбинском районе поражена многолетней мерзлотой. Наличие мерзлоты замедляет производственный процесс разработки из-за необходимости оттайки пород перед их разработкой. Многолетнемерзлый грунт является тяжелым испытанием для горной техники и значительно снижает ресурс рабочего оборудования (ковшей экскаваторов, ножей и рыхлителей бульдозеров).

Особо тяжелыми условиями разработки отличаются сложноструктурные валунистые россыпи с повышенной сцепментированностью и крепостью пород. По промышленной оценке сырьевой базы Бодайбинских россыпных месторождений, выполненной в 1981 г. Иркутским научно-исследовательским институтом благородных и редких металлов и алмазов, к сильновалунистым отложениям (с содержанием валунов фракции более 200 мм свыше 10 %) относится около 70 % всех запасов рос-

сыпей. Накопленный опыт разработки таких месторождений показал, что сильная валунистость отложений существенно осложняет основные технологические процессы, делая их более трудоемкими¹².

Значительное влияние на эффект разработки россыпей оказывает поромывистость и обогатимость песков. Промывистость золотоносных пород в значительной мере зависит от степени цементации вязкими материалами (обычно пластичными глинами) (табл. 2).

Из табл. 2 следует, что в целом золотоносные пески в Бодайбинском районе промывистые (77 %). Тем не менее здесь встречаются россыпи труднопромывистые (8,3 %) и непромывистые (4,6 %) с повышенной глинистостью.

Важнейшим показателем также является глубина залегания запасов. История разработки Ленских россыпей насчитывает более 170 лет эксплуатации. По мере развития инфраструктуры в первую очередь разрабатывались россыпи с небольшими глубинами залегания запасов. Данные о глубинах месторождений россыпного золота, отработанных в период с 1931 по 1999 г., представлены в виде круговой диаграммы (рис. 5)¹³.

Таблица 1. Пораженность запасов россыпей Бодайбинского района многолетней мерзлотой¹⁴
Table 1. Permafrost in the Bodaibo district placer reserves¹⁴

Доля мерзлоты, %	Количество россыпей, шт.	Количество запасов, %
Менее 10	44	22
10–20	11	5,5
20–40	24	12
40–60	31	15,5
60–80	18	9
Более 80	73	36

Таблица 2. Степень промывистости песков в россыпях Бодайбинского района¹⁵
Table 2. The degree of sand washability in the Bodaibo region placers¹⁵

Категория пород по промывистости	Количество россыпей		Содержание пластичной глины, %
	Шт.	Отн. %	
Легкопромывистые	18	9,26	Менее 10
Промывистые	151	77,8	10–15
Труднопромывистые	16	8,24	Более 15
Непромывистые	9	4,6	–

¹² Кудряшов Е. В. Изыскание эффективной технологии дражной разработки валунистых россыпей: автореф. дис. ... канд. техн. наук: 05.15.03. Иркутск, 1996. 19 с.

¹³ Коткин В. В., Тищенко Е. И. Прогнозно-поисковые работы по оценке прогнозных ресурсов техногенных отвалов, россыпей с тонким и мелким золотом с составлением карты золотоносности Ленского горнопромышленного района (Ленский объект): отчет по Государственному контракту №111-120. Иркутск, 2008. 546 с. Изв. № 17315.

¹⁴ Там же.

¹⁵ Там же.

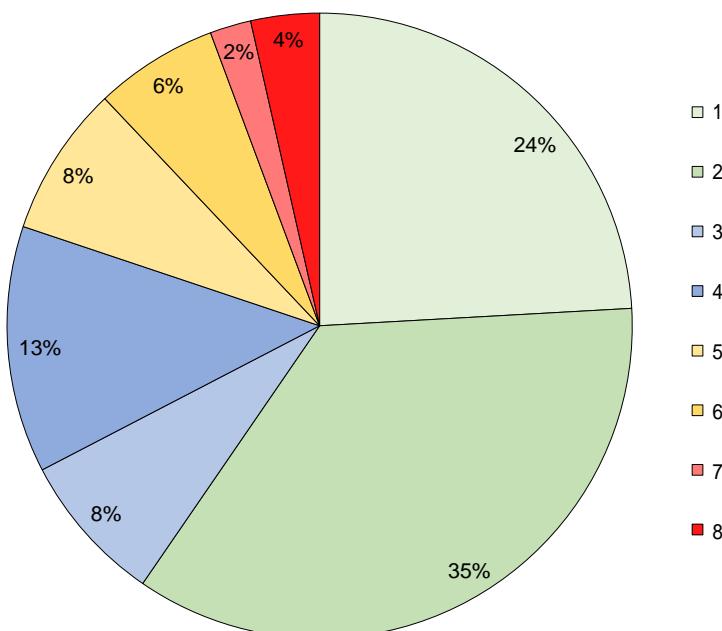


Рис. 5. Распределение россыпей, отработанных в период с 1931 по 1999 г., по глубине залегания запасов:

1 – до 5 м; 2 – 5–10 м; 3 – 10–15 м; 4 – 15–20 м; 5 – 20–25 м; 6 – 25–30 м; 7 – 30–35 м; 8 – свыше 35 м

Fig. 5. Distribution of abandoned placers developed in the period from 1931 to 1999 by the reserve depth:

1 – up to 5 m; 2 – 5–10 m; 3 – 10–15 m; 4 – 15–20 m; 5 – 20–25 m; 6 – 25–30 m; 7 – 30–35 m; 8 – over 35 m

Глубина залегания запасов средних и крупных россыпных месторождений, отработанных в период с 1931 по 1999 г., составила в среднем 12,5 м. Небольшую глубину залегания (до 10 м) имели 59,9 % разработанных в указанный период месторождений. Небольшие глубины залегания запасов имели такие богатейшие россыпи по р. Хомолхо (7,8 м), Большой Баллаганах (5,8 м), Бульбухта (4,5 м), Таймендра (5,1 м). Среднюю глубину залегания запасов (от 10 до 20 м) имели 20,4 % месторождений, в том числе богатейшие россыпи по р. Ныгри (15 м), Вача (12,8 м), Угахан (18 м). К глубоким и сверхглубоким россыпям (свыше 20 м) в указанный период относились 19,7 % месторождений, в том числе богатейшие россыпи по р. Бодайбо (15–33,5 м), Маракан (35 м), Большой Чанчик (21,2 м), Камустяг (25 м), Тахтыкан-Берикан (60 м). Как показывает практика, наиболее богатыми оказываются глубокие (древние погребенные) россыпи и, если провести анализ с учетом добывших из недр запасов, можно выявить, что большая часть золота была добыта как раз из глубоких месторождений. Из вышеизложен-

ного следует, что добыча золота с Бодайбинском районе связана с необходимостью выполнения значительных объемов вскрышных работ.

Ухудшение минерально-сырьевой базы связано также с падением содержания золота в запасах – данный показатель представлен на рис. 6¹⁶. Вместе с тем следует отметить, что снижение содержания золота в песках за последние полвека происходило гораздо медленнее, чем прогнозировалось специалистами.

Из рис. 6 следует, что среднее содержание начало уменьшаться только с 2011 г., а до этого момента этот показатель даже повышался, что было связано в первую очередь с уменьшением доли дражных запасов (см. рис. 4), в которых среднее содержание практически в 3–5 раз меньше, чем в запасах для открытого раздельного способа.

Далее обратимся к рассмотрению структуры, качества и количества техногенных россыпей и их роли в золотодобыче Иркутской области. Добыча россыпного золота в Иркутской области имеет богатую историю, начавшуюся еще в дореволюционный период. За этот

¹⁶ Коткин В. В., Тищенко Е. И. Прогнозно-поисковые работы по оценке прогнозных ресурсов техногенных отвалов, россыпей с тонким и мелким золотом с составлением карты золотоносности Ленского горнопромышленного района (Ленский объект): отчет по Государственному контракту №111-120. Иркутск, 2008. 546 с. Инв. № 17315.

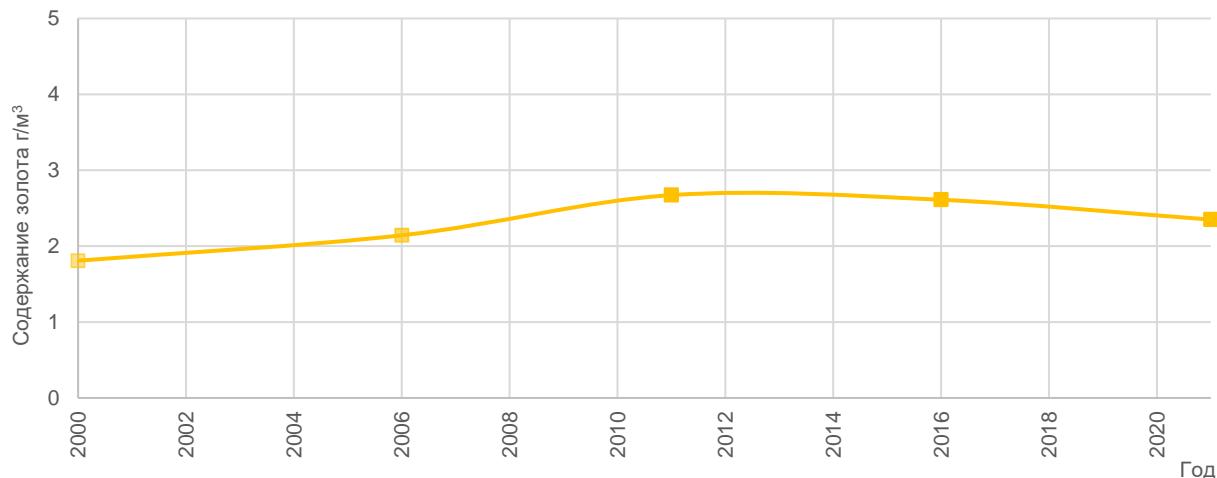


Рис. 6. Изменение среднего содержания золота в песках в период с 2000 по 2021 г.
Fig. 6. Variation of average grade of gold in sands from 2000 to 2021

период различными способами (мускульным, гидравлическим, подземным, дражным, открытым раздельным) были отработаны сотни месторождений. Результатами отработки предшественников помимо добываемого золота оказалось возникновение многочисленных техногенных месторождений. Причиной появления таких месторождений послужили потери, возникающие в процессе их разработки. Именно техногенные месторождения таят в себе большой потенциал для поддержания россыпной золотодобычи на современном этапе и могут значительно пополнить имеющуюся минерально-сырьевую базу.

Впервые понятие «техногенная россыпь» для россыпей с промышленной концентрацией полезного компонента, возникающих в результате потерь в процессе их первичной отработки, было применено Н. А. Шило (1958). Он ввел это понятие в единую генетическую классификацию россыпей, выделив генетический, морфологический и возрастной ряды совокупности остаточно-целикового и отвального комплексов. Следует заметить, что в настоящее время наиболее распространено расширенное толкование термина «техногенная россыпь», по которому к техногенным запасам относятся остаточно-целиковые и отвальные их разновидности.

Золотоносность техногенной россыпи напрямую связана с количеством потерь, воз-

никающих в результате ее предыдущих разработок.

Качество техногенной россыпи зависит от многих факторов. Основным из них являются первоначальные потери. Чем больше потеря возникало во время предыдущих работ, тем богаче техногенная россыпь.

Потери золота при отработке россыпных месторождений складываются из трех крупных блоков:

- потери при промывке песков (технологические);
- потери при вскрышных работах;
- потери в недрах при неполной отработке россыпей (эксплуатационные потери)¹⁷.

К основным факторам, определяющим потери при промывке песков, большинство исследователей относит гранулометрию и морфологию металла, промывистость песков, применяемые при промывке технические средства. В отдельных случаях на технологические потери заметное влияние оказывает мерзлота. При данных обстоятельствах техногенная россыпь представлена галечными и эфельными отвалами, оставшимися после промывки.

Потери при вскрышных работах возникают при удалении торфов, лежащих на кровле пласта, а также на россыпях, в которых преобладают рассредоточенный и пропластковый типы распределения золота в вертикальном

¹⁷ Коткин В. В., Тищенко Е. И. Прогнозно-поисковые работы по оценке прогнозных ресурсов техногенных отвалов, россыпей с тонким и мелким золотом с составлением карты золотоносности Ленского горнопромышленного района (Ленский объект): отчет по Государственному контракту №111-120. Иркутск, 2008. 546 с. И nv. № 17315.



разрезе. В этих случаях техногенная россыпь представлена вскрышными отвалами, которые нередко могут быть интересны для повторной переработки.

На потери в недрах, возникающие при не- полной отработке россыпей (эксплуатационные потери), влияет множество факторов: характер плотика и глубина проникновения в него металла; охват песков многолетней мерзлотой и способность их к оттаиванию; техническая оснащенность предприятий золотодобычи; наличие эксплуатационной разведки; использованные при подсчете запасов кондиции; мощность торфов и глубина вскрыши; степень выдержанности россыпи; интенсивность притока воды в карьер и полнота осушения отложений; качество разведочных работ. Перечисленные факторы приводят к недоработке целиковой россыпи и возникновению техногенной россыпи остаточно целикового типа, запасы которой могут быть локализованы в бортовых целиках, плотике, а также отдельных участков долины (которые не были достаточно разведаны или были недоработаны).

Для оценки количества техногенных образований обратимся к материалам отчета В. В. Коткина и Е. А. Тищенко «Прогнозно-поисковые работы по оценке прогнозных ресурсов техногенных отвалов, россыпей с тонким и мелким золотом с составлением карты золотоносности Ленского горнопромышленного района (Ленский объект)»¹⁸, выполненного в ФГУНПГП «Иркутскгеофизика» в 2008 г. Авторами отчета была проделана монументальная работа, в результате которой разработана методика оценки прогнозных ресурсов техногенного комплекса Ленского золотоносного района.

Из данных отчета¹⁹ следует, что большая часть прогнозных ресурсов приходится на гале-эфельные отвалы (76,5 т, 47 %) и на остаточно целиковую россыпь (72,7 т, 44 %), а меньшее количество – на вскрышные отвалы (15,4 т, 9 %), основная часть которых не представляет интереса для разработки.

С учетом прогнозных ресурсов количество запасов в техногенных россыпях Иркутской области может достигнуть 257,9 т, то есть увеличиться на 137 %. Если учесть, что эти запасы будут эксплуатироваться дражным или открытый раздельным способом, то прирост запасов для этих способов составит 160 %. Отсюда следует факт того, что запасов и прогнозных ресурсов россыпного золота в Иркутской области при сложившимся уровне добычи достаточно более, чем на четверть века.

Вместе с тем разработка россыпей сопряжена с большой землеемкостью работ, нарушением и уничтожением растительности, загрязнением вод [4–8]. В связи с этим в некоторых странах она приостановлена. Экологические проблемы, связанные с золотодобычей, возникают на разных типах месторождений и при любых способах их разработки [9–14], однако наименьшее негативное влияние на природу будет оказываться при вовлечении в эксплуатацию техногенных отложений. Примеров рационального вовлечения в разработку техногенных россыпей достаточно много [15–22].

Как считают многие специалисты, наибольший интерес вызывает вовлечение в эксплуатацию остаточно целиковых россыпей, гале-эфельных отвалов дражной разработки и отвалов от промывки песков, добытых подземным способом (за исключением отвалов, возникших при обогащении песков с применением амальгамации).

По мнению некоторых специалистов, отрасль россыпной золотодобычи должна была прекратить свое существование еще в 2010–2015 гг. Вопреки этому мнению, на основе представленных выше фактических данных видно, что подотрасль россыпной золотодобычи стабильно функционирует на протяжении последних 20 лет. Какого-либо прироста запасов и увеличения объемов добычи в этой подотрасли, скорее всего, не произойдет, тем не менее нет и предпосылок для падения устоявшихся уровней переработки песков и производства золота.

¹⁸ Коткин В. В., Тищенко Е. И. Прогнозно-поисковые работы по оценке прогнозных ресурсов техногенных отвалов, россыпей с тонким и мелким золотом с составлением карты золотоносности Ленского горнопромышленного района (Ленский объект): отчет по Государственному контракту №111-120. Иркутск, 2008. 546 с. Изв. № 17315.

¹⁹ Там же.



Анализ минерально-сырьевой базы россыпей Иркутской области показал, что в последние 20 лет наблюдается постепенное ухудшение качества запасов и период разработки простых в освоении месторождений россыпного золота подходит к концу. Развитие россыпной золотодобычи в обозримом будущем будет связано с разработкой техногенных образований, удаленных месторождений и запасов со сложными горнотехническими условиями залегания. За этот период в технологиях разработки россыпей кардинальных изменений не произошло, и большинство недропользователей пользуется на данный момент старыми и «проверенными» решениями. Проблема в том, что зачастую данные решения уже неэффективны и эксплуатация россыпей становится малорентабельной. Для эффективной разработки более сложных месторождений специалистам различных направлений необходимо будет решить большое количество технико-экономических и организационных задач. Особое внимание при решении проблем, связанных с технологиями освоения россыпных месторождений, следует уделить следующим критериям: созданию конкурентоспособных технологий, направленных на экономически выгодную, экологически безопасную выемку и переработку минерального сырья; совершенствованию основных технологических процессов, учитывающих многообразие генетических особенностей месторождений, их природные и горнотехнические характеристики; модернизации существующих технологий поисков и разведки россыпного золота; изысканию эффективных способов оценки техногенных образований.

Следует также отметить, что кроме технических и экономических задач для повышения эффективности разработки россыпей необходимо решить вопросы, связанные с несовершенством законодательной базы в сфере недропользования, вопросы развития инфраструктуры районов золотодобычи, государственной поддержки поисковых и геологоразведочных работ, подготовки кадров в сфере россыпной золотодобычи. Для сохранения темпов освоения россыпных месторождений решение этих вопросов является не менее актуальным.

Заключение

На основе представленных выше данных можно сформулировать следующие выводы:

1. Основные перспективы развития золотодобычи в Иркутской области связаны с рудными месторождениями, в которых сосредоточено 95,8 % всех запасов. Динамика добычи рудного золота за последние 10 лет характеризуется ежегодным приростом на 7–19 %.

2. Рассыпная золотодобыча в регионе остается по-прежнему стабильной, около 40 % золота добывается из россыпей. При этом имеет место стабильный прирост менее разведанных и качественных запасов.

3. На 1 января 2021 г. в регионе преобладает открытый раздельный способ добычи, на который приходится 74,2 т (категории A+B+
+C₁+C₂), что составляет 68,2 % балансовых запасов россыпного золота региона; на дражный способ приходится 19,3 т (17,7 %), на подземный – 13,9 т (12,8 %), на гидравлический – 1,3 т (1,2 %).

4. «Срабатывание» высококатегорийных запасов существенно опережает их прирост, при этом прирост низкокатегорийных запасов заметно опережает их добычу. Например, для открытого раздельного способа этот баланс составляет -34,5 % (A+B+C₁) и +155,6 % (C₂). Этот показатель наглядно показывает ухудшение качества разведки минерально-сырьевой базы россыпных месторождений региона.

5. Горнотехнические условия залегания россыпных месторождений в Бодайбинском районе в целом достаточно сложные. Большая часть месторождений в различной степени поражена мерзлотой, около 70 % россыпей являются сильновалунистыми, часть россыпей труднопромывистые (8,3 %) и непромывистые (4,6 %). Большая доля запасов относится к глубокозалегающим, средняя глубина разработанных за анализируемый период месторождений составляет 12,5 м. Содержание полезного компонента в россыпях постепенно снижается.

6. Освоение техногенных образований может значительно пополнить минерально-сырьевую базу россыпного золота региона (+160 %). Эффективная разработка техногенных россыпей будет связана с открытым раздельным и дражным способами добычи.

**Список источников**

1. Иванов В. Н. Сырьевая база золота, динамика производства, объекты, перспективы и тенденции развития золотодобывающей отрасли Иркутской области // *Золото и технологии*. 2017. № 4. С. 94–105.
2. Тальгамер Б. Л., Тютрин С. Г., Ершов В. А. Со-стояние и перспективы дражной золотодобычи в Иркутской области // *Золотодобыча*. 2016. № 217. [Электронный ресурс]. URL: <https://zolotodb.ru/article/11656> (20.01.2022).
3. Волков А. В. Золотые перспективы Иркутской области // *Золото и технологии*. 2017. № 4. С. 118–127.
4. Козлов А. П., Митюшова М. А. Экологические проблемы при освоении россыпных месторождений // Проблемы освоения недр в XXI веке глазами молодых: материалы VIII Междунар. науч. школы молодых ученых и специалистов (г. Москва, 14–18 ноября 2011 г.). М.: Изд-во ИПКОН РАН, 2011.
5. Сорокина О. А. Экологические проблемы при освоении россыпных месторождений золота юга Дальнего Востока // Функционирование геосистем: материалы III регион. науч.-практ. конф. к Всемирным дням воды и метеорологии (г. Владивосток, 21–22 марта 2002 г.). Владивосток: Изд-во ДВФУ, 2002. С. 97–98.
6. Мирзеханова З. Г., Мирзеханов Г. С. Ресурсно-экологические проблемы разработки россыпных месторождений золота // Проблемы геоэкологии и рационального природопользования стран Азиатско-Тихоокеанского региона: материалы Междунар. науч.-практ. конф. (г. Владивосток, 5–7 сентября 2000 г.). Владивосток: Изд-во ДВГТУ, 2000. С. 82–83.
7. Янин Е. П. Экологические последствия разработки россыпных месторождений. Обзор // Проблемы окружающей среды и природных ресурсов. 2019. № 7. С. 10–54.
8. Луняшин П. Д. Россыпи и экология: разумное сочетание возможно // *Золото и технологии*. 2020. № 4. С. 126.
9. Eßer G., Janz S., Walther H. Promoting biodiversity in recultivating the rhenish lignite-mining area // *World of Mining – Surface and Underground*. 2017. Vol. 69. Iss. 6. P. 327–334.
10. Egidarev E. G., Simonov E. A. Assessment of the environmental effect of placer gold mining in the Amur river basin // *Water Resources*. 2015. Vol. 42. P. 897–908. <https://doi.org/10.1134/S0097807815070039>.
11. Sabah A. A.-W., Fouzul A. M. The environmental impact of gold mines: pollution by heavy metals // *Open Engineering*. 2012. Vol. 2. Iss. 2. P. 304–313. <https://doi.org/10.2478/s13531-011-0052-3>.
12. Fashola M. O., Ngole-Jeme V. M., Babalola O. O. Heavy metal pollution from gold mines: environmental effects and bacterial strategies for resistance // *International Journal of Environmental Research and Public Health*. 2016. Vol. 13. Iss. 11. P. 1047. <https://doi.org/10.3390/ijerph13111047>.
13. Hilson G. The environmental impact of small-scale gold mining in Ghana: identifying problems and possible solutions // *The Geographical Journal*. 2002. Vol. 168. Iss. 1. P. 57–72. <https://doi.org/10.1111/1475-4959.00038>.
14. Orimoloye I. R., Ololade O. O. Potential implications of gold-mining activities on some environmental components: a global assessment (1990 to 2018) // *Journal of King Saud University – Science*. 2020. Vol. 32. Iss. 4. P. 2432–2438. <https://doi.org/10.1016/j.jksus.2020.03.033>.
15. Жученко Е. Т., Тальгамер Б. Л., Жученко Е. Е. К вопросу дражной разработки техногенных россыпей // Проблемы освоения минеральной базы Восточной Сибири: сб. науч. тр. Вып. 7. Иркутск: Изд-во ИрГТУ, 2007. С. 5–8.
16. Тальгамер Б. Л., Чемезов В. В., Неретин А. В., Дементьев С. А. Оценка потерь алмазов при дражной разработке россыпей // Проблемы развития минеральной базы Восточной Сибири. Вып. 3. Иркутск: Изд-во ИрГТУ, 2003. С. 44–48.
17. Овешников Ю. М., Большаков А. И. Некоторые результаты исследований по полноте отработки россыпных месторождений драгами // Разработка россыпных месторождений: сб. науч. тр. М.: Изд-во МГРИ, 1987. С. 67–71.
18. Кавчик Б. К. Новые технологии для россыпной золотодобычи // *Золотодобыча*. 2016. № 212. [Электронный ресурс]. URL: <https://zolotodb.ru/article/11485> (20.01.2022).
19. Grayson R. F. BAT – Best Available Techniques for placer gold miners // *The Gold Miner's Book*. 2017. P. 17–28.
20. Walker D. Placer gold mining in Mongolia – the New Zealand way // *World Placer Journal*. 2001. Vol. 2. P. 26–29.
21. Череменов С. А. Прииск Соловьевский: 150 лет золотодобычи и реалии сегодняшнего дня // *Золотодобыча*. 2018. № 230. [Электронный ресурс]. URL: <https://zolotodb.ru/article/11843> (20.01.2022).
22. Череменов С. А. Опыт применения мобильных промывочных комплексов, разработанных специалистами АО «Прииск Соловьевский» // *Золотодобыча*. 2017. № 220. [Электронный ресурс]. URL: <https://zolotodb.ru/article/11610> (20.01.2022).

References

1. Ivanov V. N. Raw material base of gold, production dynamics, facilities, development prospects and trends of the Irkutsk region gold mining industry. *Zoloto i tekhnologii*. 2017;4:94-105. (In Russ.).
2. Tal'gamer B. L., Tyutrin S. G., Ershov V. A. Status and prospects of dredging gold mining in the Irkutsk region. *Zolotodobycha*. 2016;217. Available from: <https://zolotodb.ru/article/11656> [Accessed 20th January 2022]. (In Russ.).
3. Volkov A. V. Gold prospects for the Irkutsk region. *Zoloto i tekhnologii*. 2017;4:118-127. (In Russ.).
4. Kozlov A. P., Mityushova M. A. Environmental problems in the development of alluvial deposits. In: *Problemy*



osvoeniya nedr v XXI veke glazami molodykh: materialy VIII Mezhdunar. nauch. shkoly molodykh uchenykh i spezialistov = Problems of subsoil development in the 21st century through the eyes of the young: materials of the 8th International scientific schools of young scientists and specialists. 14–18 November 2011, Moscow. Moscow: Institute of Comprehensive Exploitation of Mineral Resources, Russian Academy of Sciences; 2011. (In Russ.).

5. Sorokina O. A. Environmental problems in the development of alluvial gold deposits in the south of the Far East. In: *Funktsionirovanie geosistem: materialy III region. nauch.-prakt. konf. k Vsemirnym dnyam vody i meteorologii = Functioning of geosystems: materials of the 3^d regional scientific and practical conference for the World Days of Water and Meteorology*. 21–22 March 2002, Vladivostok. Vladivostok: Far Eastern Federal University; 2002, p. 97–98. (In Russ.).

6. Mirzehanova Z. G., Mirzehanov G. S. Resource-environmental problems of alluvial gold deposit development. In: *Problemy geoekologii i ratsional'nogo prirodopol'zo-vaniya stran Aziatko-Tikhookeanskogo regiona: materialy Mezhdunar. nauch.-prakt. konf. = Problems of geoecology and rational environmental management in the countries of the Asia-Pacific region: materials of the International scientific and practical conference*. 5–7 September 2000, Vladivostok. Vladivostok: Far Eastern State Technical University; 2000, p. 82–83. (In Russ.).

7. Yanin E. P. Environmental impact of alluvial deposit development. Overview. *Problemy okruzhayushchey sredy i prirodykh resursov*. 2019;7:10-54. (In Russ.).

8. Lunyashin P. D. Placers and ecology: a reasonable combination is possible. *Zoloto i tekhnologii*. 2020;4:126. (In Russ.).

9. Eßer G., Janz S., Walther H. Promoting biodiversity in recultivating the rhenish lignite-mining area. *World of Mining – Surface and Underground*. 2017;69(6):327-334.

10. Egidarev E. G., Simonov E. A. Assessment of the environmental effect of placer gold mining in the Amur river basin. *Water Resources*. 2015;42:897-908. <https://doi.org/10.1134/S0097807815070039>.

11. Sabah A. A.-W., Fouzul A. M. The environmental impact of gold mines: pollution by heavy metals. *Open Engineering*. 2012;2(2):304-313. <https://doi.org/10.2478/s13531-011-0052-3>.

12. Fashola M. O., Ngole-Jeme V. M., Babalola O. O. Heavy metal pollution from gold mines: environmental

effects and bacterial strategies for resistance. *International Journal of Environmental Research and Public Health*. 2016;13(11):1047. <https://doi.org/10.3390/ijerph13111047>.

13. Hilson G. The environmental impact of small-scale gold mining in Ghana: identifying problems and possible solutions. *The Geographical Journal*. 2002;168(1):57-72. <https://doi.org/10.1111/1475-4959.00038>.

14. Orimoloye I. R., Ololade O. O. Potential implications of gold-mining activities on some environmental components: a global assessment (1990 to 2018). *Journal of King Saud University – Science*. 2020;32(4):2432-2438. <https://doi.org/10.1016/j.jksus.2020.03.033>.

15. Zhuchenko E. T., Tal'gamer B. L., Zhuchenko E. E. On the issue of dredge development of technogenic placers. In: *Problemy osvoeniya mineral'noi bazy Vostochnoi Sibiri = Development problems of the mineral base of Eastern Siberia*. Iss. 7. Irkutsk: Irkutsk State Technical University; 2007, p. 5–8. (In Russ.).

16. Tal'gamer B. L., Chemezov V. V., Neretin A. V., Dement'ev S. A. Estimation of diamond losses under placer dredge mining. In: *Problemy razvitiya mineral'noi bazy Vostochnoi Sibiri = Development problems of the mineral base of Eastern Siberia*. Iss. 3. Irkutsk: Irkutsk State Technical University; 2003, p. 44–48. (In Russ.).

17. Oveshnikov Yu. M., Bol'shakov A. I. Some research results on the completeness of alluvial deposit mining by dredges. In: *Razrabotka rossypnykh mestorozhdenii = Development of alluvial deposits*. Moscow: Moscow Geological Prospecting Institute; 1987, p. 67–71. (In Russ.).

18. Kavchik B. K. New technologies for alluvial gold mining. *Zolotodobycha*. 2016;212. Available from: <https://zolotodb.ru/article/11485> [Accessed 20th January 2022]. (In Russ.).

19. Grayson R. F. BAT – Best Available Techniques for placer gold miners. *The Gold Miner's Book*. 2017;17-28.

20. Walker D. Placer gold mining in Mongolia – the New Zealand way. *World Placer Journal*. 2001;2:26-29.

21. Cheremenov S. A. The Solovievsky gold mine: 150 years of gold mining and today's realities. *Zolotodobycha*. 2018;230. Available from: <https://zolotodb.ru/article/11843> [Accessed 20th January 2022]. (In Russ.).

22. Cheremenov S. A. Application experience of mobile washing complexes developed by the specialists of JSC "Priisk Solovievsky". *Zolotodobycha*. 2017;220. Available from: <https://zolotodb.ru/article/11610> [Accessed 20th January 2022]. (In Russ.).

Информация об авторах / Information about the authors



Дорош Егор Алексеевич,
исполнительный директор,
ООО «СибЗолото»,
г. Иркутск, Россия,
egordoros3@gmail.com.
Egor A. Dorosh,
Executive Director,
SibZoloto LLC,
Irkutsk, Russia,
egordoros3@gmail.com.



Тальгамер Борис Леонидович,
доктор технических наук, профессор,
заведующий кафедрой разработки месторождений полезных ископаемых,
Институт недропользования,
Иркутский национальный исследовательский технический университет,
г. Иркутск, Россия,
talgamer@istu.edu,
<https://orcid.org/0000-0003-1413-0116>.

Boris L. Talgamer,
Dr. Sci. (Eng.), Professor,
Head of the Department of Mineral Deposits Development,
Institute of Subsoil Use,
Irkutsk National Research Technical University,
Irkutsk, Russia,
talgamer@istu.edu,
<https://orcid.org/0000-0003-1413-0116>.

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 27.01.2022; одобрена после рецензирования 14.06.2022; принятая к публикации 16.08.2022.

The article was submitted 27.01.2022; approved after reviewing 14.06.2022; accepted for publication 16.08.2022.



Научная статья

УДК 553.08+553.2

<https://doi.org/10.21285/2686-9993-2022-45-3-235-245>



Стадийность образования рудных минералов участка Средний Многовершинного месторождения

Галина Дмитриевна Мальцева^a, Марина Владиславовна Яхно^b,
Раиса Nikolaevna Ivanova^c, Галина Nikolaevna Burueva^d

^{a-c}Иркутский национальный исследовательский технический университет, г. Иркутск, Россия

^dСН Голд Майнинг-Кыра – обособленное подразделение ООО «СН Голд Майнинг», с. Кыра, Россия

Автор, ответственный за переписку: Иванова Раиса Nikolaevna, ivanova_rn@ex.istu.edu

Резюме. Золоторудное месторождение Многовершинное (Хабаровский край, Россия) на сегодняшний день является значимым промышленным объектом, на котором постоянно проводятся работы по приросту запасов за счет установления новых объектов в пределах рудного поля и разведки глубоких горизонтов. Цель представленного исследования заключалась в изучении стадийности образования рудных минералов одного из участков месторождения, а также выявлении минералогических и структурно-текстурных особенностей руд. Методы минералого-петрографического изучения вещественного состава руд широко применяются в геологической практике и позволяют устанавливать вещественные особенности исследуемых объектов, определять ход процесса рудообразования. Изучение типов руд проводилось с использованием микроскопа Olympus BX51. На основе авторских полевых наблюдений выполнено минералого-петрографическое изучение образцов руд и вмещающих пород участка Средний Многовершинного месторождения. Установлено несколько иное понимание стадийности образования рудной минерализации данного участка месторождения. В процессе исследования выявлено не менее трех этапов формирования вещественного комплекса данного участка месторождения. Первый этап – магматический, характеризующийся формированием пирита первой генерации. Второй – собственно рудный гидротермальный, в результате которого произошло формирование золотосульфидной минерализации: пирита второй генерации, халькопирита, магнетита, кюстелита. В конце второго этапа образовался жильный кварц – также с рудными минералами: пиритом, халькопиритом, магнетитом, незначительным количеством кюстелита и самородной медью. Третий этап – экзогенный, в ходе которого происходило формирование структур замещения и окисления с образованием гидроокислов железа. Исследования руд Многовершинного месторождения еще раз показали наличие полисульфидной многостадийной минерализации, которая развивалась в тесной связи с магматическим процессом. Знание стадийности образования месторождения является составной частью создания его геолого-структурных моделей, которые необходимы для повышения эффективности геолого-разведочных работ в пределах изучаемых объектов.

Ключевые слова: месторождение золота, минералого-петрографическое изучение руд, стадия образования минералов, кюстелит, халькопирит, пирит

Для цитирования: Мальцева Г. Д., Яхно М. В., Иванова Р. Н., Буруева Г. Н. Стадийность образования рудных минералов участка Средний Многовершинного месторождения // Науки о Земле и недропользование. 2022. Т. 45. № 3. С. 235–245. <https://doi.org/10.21285/2686-9993-2022-45-3-235-245>.

Original article

Ore mineral formation stages of the Sredniy site (Mnogovershinnoye deposit)

Galina D. Maltseva^a, Marina V. Yakhno^b, Raisa N. Ivanova^c, Galina N. Burueva^d

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

^dSN Gold Mining-Kyra – a separate division of LLC SN Gold Mining, Kyra settlement, Russia

Corresponding author: Raisa N. Ivanova, ivanova_rn@ex.istu.edu

Abstract. The Mnogovershinnoye gold deposit (Khabarovsk Territory, Russia) today is a significant industrial facility, which features extension additions as a results of additional in-mine exploration of deep horizons and identification of new objects within the ore field. The purpose of this work is to study the formation stages of ore minerals of one of the deposit sites as well as to identify the mineralogical and structural-textural features of ores. The methods of mineralogical and petrographic study of the material composition of ores are widely used in geological practice and allow to determine the material features

© Мальцева Г. Д., Яхно М. В., Иванова Р. Н., Буруева Г. Н., 2022



of the studied objects as well as describe the ore formation process. The study of ore types was carried out using an Olympus BX51 microscope. Field observations performed by the authors served the base for the mineralogical and petrographic study of ore samples and host rocks of the Sredniy site of the Mnogovershinnoye deposit, which led to a slightly different understanding of formation stages of ore mineralization of this section of the deposit. The study revealed at least three formation stages of the material complex of this site of the deposit. The first stage is a magmatic one. It characterizes with the formation of pyrite of the first generation. The second stage is an ore hydrothermal one, as a result of which the gold-sulfide mineralization was formed including pyrite of the second generation, chalcopyrite, magnetite, kustelite. Gangue quartz was formed at the end of the second stage together with such ore minerals as pyrite, chalcopyrite, magnetite, and an insignificant amount of kustelite and native copper. The third stage is an exogenous one, during which substitution and oxidation structures were formed with iron hydroxide evolution. The studies of the ores of the Mnogovershinnoye deposit have shown once again the presence of polysulfide multistage mineralization, which had been developing in close connection with the magmatic process. Knowledge about the deposit formation stages is an integral part of the creation of geological and structural models of the deposit, which are necessary to increase the efficiency of geological exploration within the studied objects.

Keywords: gold field, mineralogical and petrographic study of ores, mineral formation stage, kustelite, chalcopyrite, pyrite

For citation: Maltseva G. D., Yakhno M. V., Ivanova R. N., Burueva G. N. Ore mineral formation stages of the Sredniy site (Mnogovershinnoye deposit). *Nauki o Zemle i nedropol'zovanie = Earth sciences and subsoil use*. 2022;45(3):235-245. (In Russ.). <https://doi.org/10.21285/2686-9993-2022-45-3-235-245>.

Введение

Многовершинное месторождение (Хабаровский край, Россия) представлено сближенными крутопадающими золото-кварцевыми жилами и окварцованными зонами минерализации, тяготеющими к полосе развития разломов северо-восточного простирания [1–3].

По глубине формирования данное месторождение является переходным между близкими к поверхности месторождениями и месторождениями формации средних глубин. Его формирование происходило в крутозалегающих экранированных магмапроводящих и флюидопроводящих структурах под действием накопления и активного перемещения флюидов в тепловых полях субвулканических тел. Основной характеристикой его образования является наличие генетической связи с магматическими очагами и с вулканическими процессами [4].

Предыдущими исследованиями было установлено, что формирование руд месторождения происходило в несколько этапов [2, 5–7]. На первом этапе сформировались мощные жилообразные тела с золотым орудением, представленные двумя разновременными минеральными ассоциациями: кварц-адуляр-гидрослюдистой и золото-халькопирит-блеклорудной, а также сфалерит-теллуридной. На последующих этапах – скарновом и турмалиновом – сформировалась гнездовая и прожилковая минерализация, наложенная на руды первого этапа. Третий этап характеризуется развитием редкометалльной мине-

ризации. Последовательность формирования многостадийной минерализации нарушалась межстадийными и внутриминерализационными подвижками и перерывами.

Многостадийность рудообразования обусловила многочисленные парагенетические минеральные ассоциации (коих насчитываются, по сведениям разных авторов, от шести до восемнадцати) [2, 4–7]. Продуктивными на золото являются две ассоциации: золото-халькопирит-блеклорудная и золото-сфалерит-теллуридная [5]. Первая из них обнаруживает пространственную приуроченность к кварц-адуляр-гидрослюдистой, а вторая – преимущественно к кварц-родонит-карбонатной ассоциации. Большинство исследователей сходятся во мнении, что образование золоторудной минерализации происходило на завершающих этапах вулканизма в связи с формированием субвулканических и экструзивных тел [2, 4–7]. Рудные тела размещаются в блоках пород [8], которые были интенсивно тектонически нарушены в дорудный период.

Проведенные авторами исследования изучения руд позволили несколько иначе посмотреть на процесс образования минералов рудной ассоциации в пределах изученного участка.

Материалы и методы исследования

Для минералого-петрографического изучения в ходе полевых работ были отобраны



представительные образцы руд и вмещающих пород на территории участка Средний Многовершинного месторождения. Исследования прозрачных и полированных шлифов (аншлифов) осуществлялось на базе кафедры прикладной геологии, геофизики и геоинформационных систем Института недропользования Иркутского национального исследовательского технического университета на микроскопе Olympus BX51 с использованием традиционных методик.

Результаты исследования и их обсуждение

Посредством изучения руд и вмещающих пород в прозрачных шлифах и полированных шлифах (аншлифах) было выявлено разнообразие их вещественных и структурных особенностей, а также генетических взаимоотношений пордообразующих и рудных минералов. Оруденение в основном концентрируется в вулканогенных породах, в меньшей степени – в осадочных и интрузивных породах. Вмещающие рудные тела – эффузивы – представлены вулканитами среднего состава и их жерловыми и субвулканическими породами. Вмещающий комплекс пород претерпел многократный гидротермальный и kontaktовый метаморфизм, обусловленный неоднократным внедрением интрузивов. Собственно говоря, процесс дробления и метасоматоза вулканитов является дорудной стадией формирования оруденения.

Анdezит имеет порфировую структуру (рис. 1, a, b) и состоит из плагиоклаза и вторичных минералов хлорита, кальцита и серицита. Структура породы порфировая, основная масса ортофировая. В анdezите отмечается вкрапленность сульфидов. Вкрапленники представлены в основном плагиоклазом размером от 1 до 6 мм, он образует идиоморфные кристаллы таблитчатой формы. Плагиоклаз (см. рис. 1, b) встречается в виде таблитчатых удлиненных порфиров с полисинтетическим двойникованием размером $0,01-0,5 \times 1,4$ мм. Также плагиоклаз замещается серицитом (см. рис. 1, b), который представлен мелкочешуйчатым агрегатом размером примерно от 0,01 до 0,03 мм и развивается по плагиоклазам.

Хлорит (см. рис. 1, b) представлен мелкими неправильными чешуйками и листоватыми агрегатами размерами от 0,01 до 0,03 мм в ассоциации с мелкозернистым кальцитом. Хлорит образуется после кальцита и замещается кристаллами роговой обманки, иногда в структурах замещения встречается серицит. Эпидот (см. рис. 1, b) встречается в виде призматических, сплошных и зернистых агрегатов размером от 0,01 до 0,03 мм, ассоциируется с кальцитом и замещает кристаллы роговой обманки. Кальцит (см. рис. 1, b) представлен неправильными зернами размерами до 0,2 мм.

Таким образом, анdezит сложен преимущественно микролитами полевого шпата с повсеместно наблюдаемыми расплывчатыми пятнами соссюрита. Метасоматоз в данных образцах проявляется в замещении оставшейся роговой обманки эпидотом и хлоритом, а плагиоклазов – серицитом.

Рудные минералы анdezита представлены пиритом, халькопиритом, пирротином, магнетитом, кюстелитом. Магнетит (рис. 1, c) встречается в виде мелких включений в пирите размером от 0,001 до 0,02 мм. Пирротин (см. рис. 1, c) с размерами зерен 0,01–0,07 мм относительно редок для описываемых руд, но, как правило, встречается в виде неравномерных зерен в пирите размером от 0,01 до 0,2 мм.

Кюстелит (см. рис. 1, c) – природный сплав золота и серебра, в котором преобладает серебро (примерно 70 %) – представлен мелкими окружлыми зернами размером до 0,03 мм, которые образуются по халькопириту. Пирит (см. рис. 1, c) образует отдельные бластозерна, мономинеральные зернистые агрегаты и полиминеральные сростки размером зерен от 0,01 до 0,2 мм, образующиеся в результате процессов замещения и перекристаллизации в твердом состоянии. Для пирита характерно ситовидное строение внутри кристаллов и зерен с включениями пордообразующих минералов, халькопирита, магнетита, образующих пойкилитовую структуру. По трещинам катализированного пирита развиваются гидрооксиды железа.

Кроме того, в данном аншилифе пирит встречается в виде двух генераций. Первая генерация представлена бластозернами катализированного пирита от 0,01 до 0,5 мм с тре-

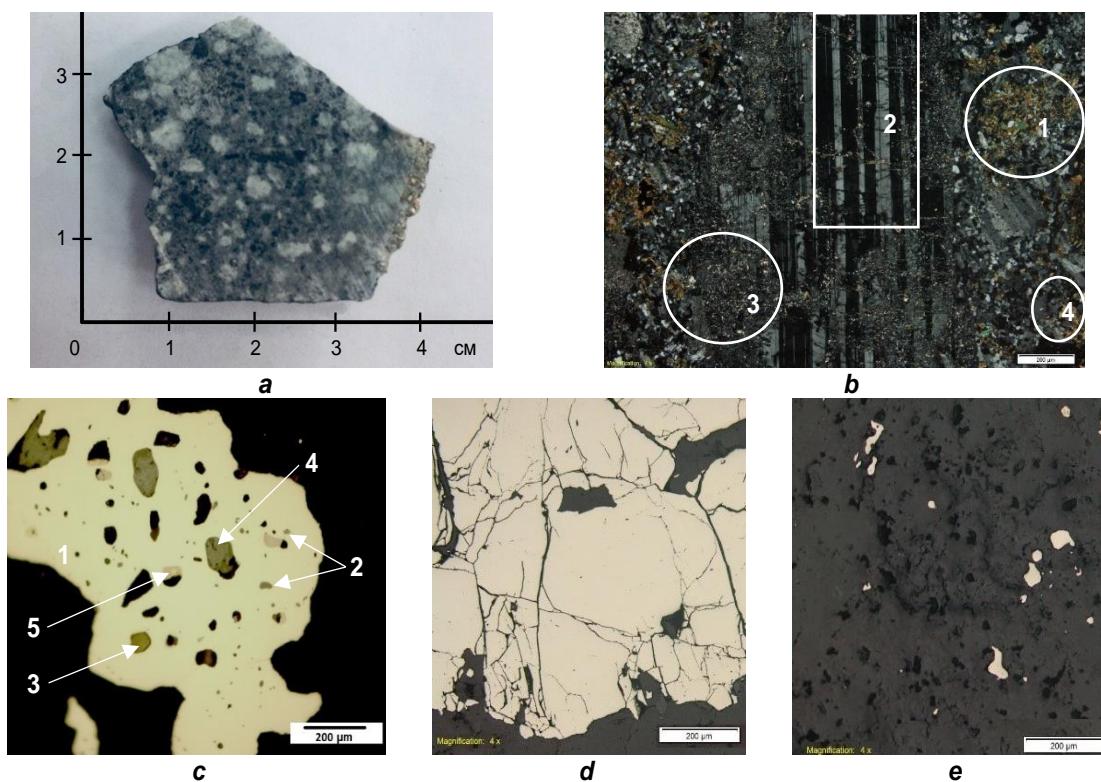


Рис. 1. Вещественный состав андезита:

a – андезит с порфировой структурой и сульфидной вкрапленностью (штуф); b – хлорит с эпидотом (1), плагиоклаз (2), серицит (3), кальцит (4) (прозрачный шлиф, николи +); c – пирит (1) с включениями магнетита (2), халькопирита (3), пирротина (4) и кюстелита (5) (полированый аншлиф); d, e – пирит во вмещающей породе: d – бластозерна пирита первой генерации, e – гипидиоморфные зерна пирита второй генерации (полированные аншлифы)

Fig. 1. The material composition of andesite:

a – andesite with the porphyry structure and sulfide inclusions (ore lump); b – chlorite with epidote (1), plagioclase (2), sericite (3), calcite (4) (thin section, nicols +); c – pyrite (1) with inclusions of magnetite (2), chalcopyrite (3), pyrrhotite (4), kustelite (5) (thinned polished section); d, e – pyrite in the host rock: d – pyrite blastonodules of the first generation, e – hypidiomorphic pyrite nodules of the second generation (thinned polished sections)

щинами, по которым могут развиваться гидроокислы железа (рис. 1, *d*). Вторая генерация пирита проявляется в виде мелких гипидиоморфных зерен во вмещающей породе с размерами от 0,01 до 0,05 мм (см. рис. 1, *e*).

Рудная минерализация представлена жильным кварцем с сульфидами (пиритом и халькопиритом) (рис. 2, *a*), хлоритом и кальцитом, а также рудным минералом магнетитом. По трещинам отмечается лимонитизация – продукт окисления сульфидов. Текстура – прожилково-вкрапленная, структура – неравномерно зернистая. Вкрапленники сульфидов имеют размер от 1 до 5 мм. При анализе шлифов дополнительно выявлены породообразующие минералы, такие как серицит и эпидот.

Кварц (рис. 2, *b*) встречается в виде разнозернистых прожилков размером от 1 до 1,4 мм по ширине в сочетании с кальцитом и

эпидотом. Также в данном шлифе отмечаются две генерации кварца. Первая генерация представлена прожилком гребенчатого кварца с тесно прижатыми друг к другу зернами размером 1,6×0,4 мм (см. рис. 2, *b*). Вторая генерация – это тонкозернистый кварц разного размера от 0,02 до 0,4 мм, который наблюдается в ассоциации с эпидотом, хлоритом, серицитом, кальцитом. Серицит в данном образце наблюдается в виде мелкочешуйчатого агрегата размерами от 0,01 до 0,03 мм, который полностью заменил плагиоклаз вместе с кальцитом и хлоритом (рис. 2, *c*). Хлорит представлен мелкими неправильными чешуйками и листоватыми агрегатами размерами от 0,01 до 0,15 мм в ассоциации с мелкозернистым кальцитом. Кальцит выполняет прожилки и зерна неправильной формы размерами 0,02–0,25×0,1 мм, наблюдается в ассоциации

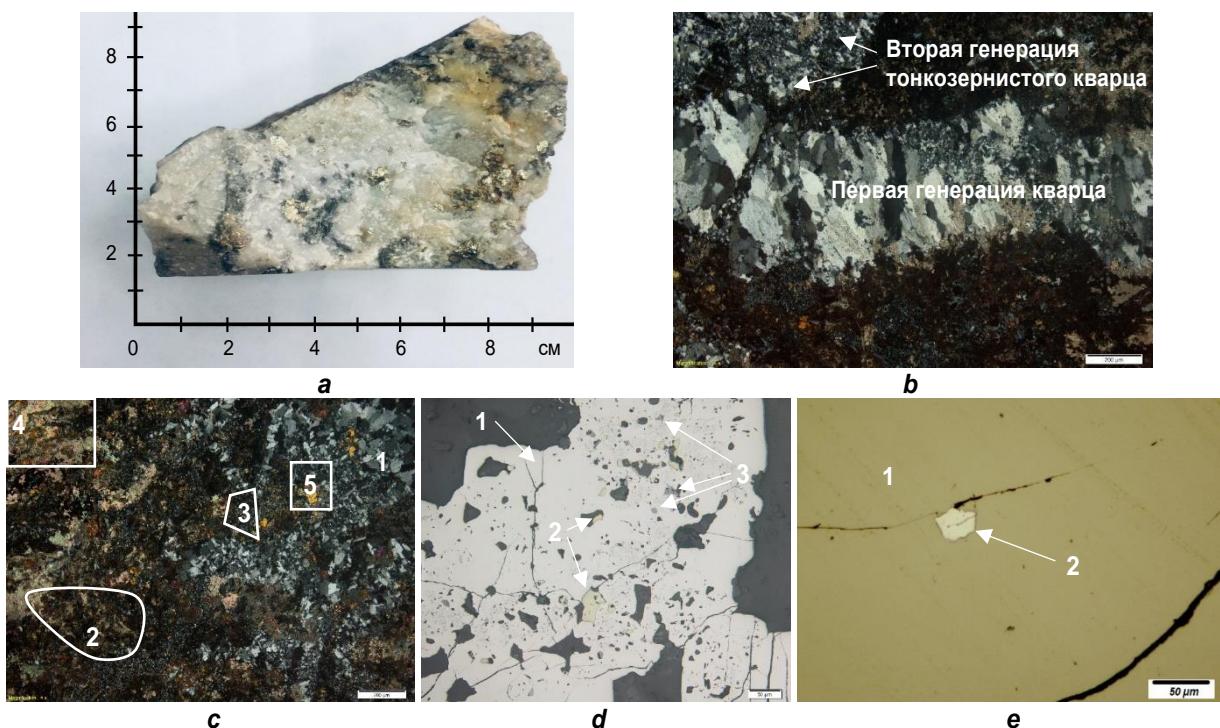


Рис. 2. Вещественный состав рудной жилы кварца:

а – жильный кварц с сульфидами (штуф); б – прожилок гребенчатого кварца первой генерации и тонкозернистый кварц второй генерации (прозрачный шлиф, николи +); в – кварц (1), серицит (2), хлорит (3), кальцит (4), эпидот (5) (прозрачный шлиф, николи +); г – бластозерно пирита (1) с включениями халькопирита (2) и магнетита (3) (полированый анишлиф); д – пирит (1) с включением кюстелита (2) (полированый анишлиф)

Fig. 2. The material composition of the quartz ore vein:

а – gangue quartz with sulfides (ore lump); б – veinlet of the comb quartz of the 1st generation and fine-grained quartz of the 2nd generation (thin section, nicols +); в – quartz (1), sericite (2), chlorite (3), calcite (4), epidote (5) (thin section, nicols +); г – pyrite blastonodule (1) with inclusions of chalcopyrite (2) and magnetite (3) (thinned polished section); д – pyrite (1) with kustelite inclusion (2) (thinned polished section)

с эпидотом. Образование кальцита происходило в одно время с хлоритом. Эпидот встречается в виде призматических, сплошных и зернистых агрегатов размерами от 0,01 до 0,05 мм в ассоциации с кальцитом (см. рис. 2, в).

Бластозерна пирита размерами 1×1,2 мм образовались в результате процессов замещения и перекристаллизации в твердом состоянии.

Пирит наблюдается с включениями халькопирита, магнетита, кюстелита, образующими пойкилитовую структуру (рис. 2, г). В отдельных образцах пирит замещается гидроксидами железа с образованием структур замещения. Обломки пирита в таких остатках образовались в процессе катаклаза и имеют остроугольную форму.

Халькопирит наблюдается в виде неправильных выделений размерами от 0,01 до

0,04 мм, которые выполняют промежутки между зернами породообразующих минералов. Магнетит образует петельчатые включения и зерна неправильной формы в бластокристаллах пирита (см. рис. 2, г) размерами от 0,01 до 0,03 мм. Данный факт свидетельствует о том, что он образовался позднее, чем пирит.

Из рудных минералов в изученных образцах жильного кварца встречается также кюстелит, который характеризуется белым цветом с легким желтоватым оттенком. Он представлен отдельными мелкими гипидиоморфными зернами размером 0,01×0,02 мм.

Кроме образцов, описание нами выше, в качестве примера по такой же методике были изучены другие образцы жильного кварца, в которых кроме стандартного набора сульфидов (рис. 3, а, б) обнаружена самородная медь (рис. 3, в).

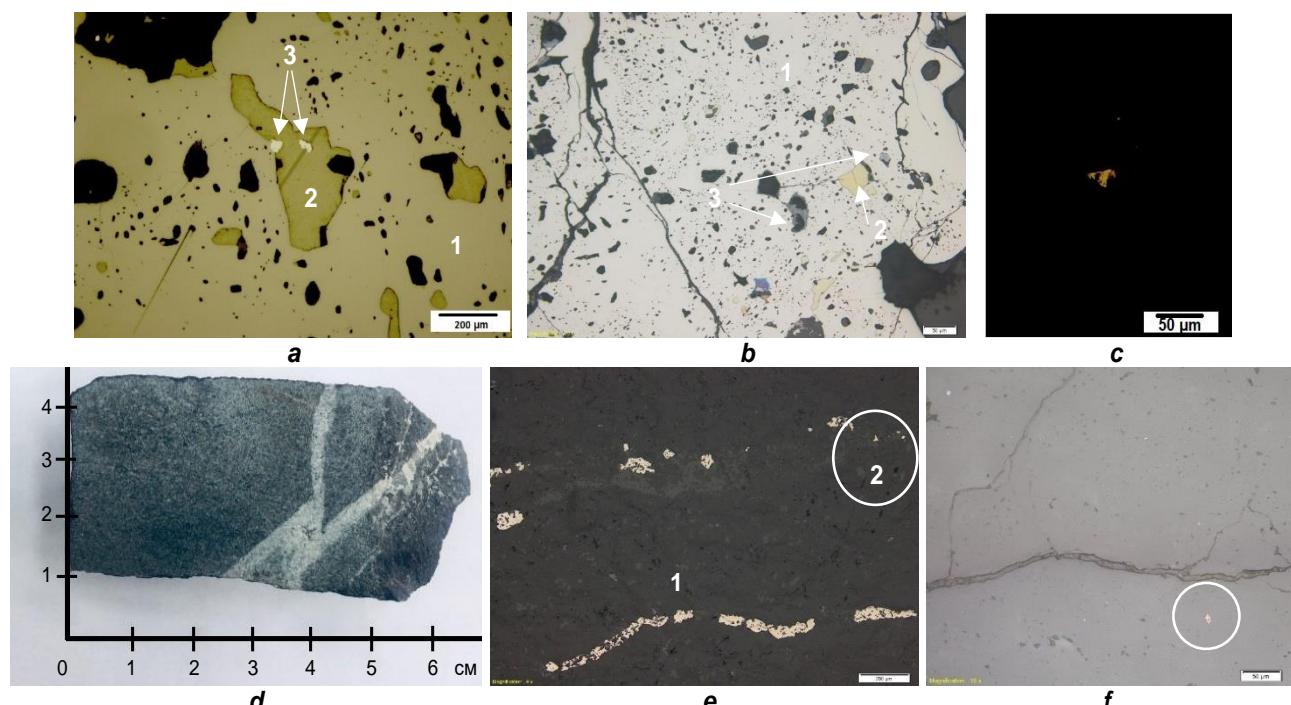


Рис. 3. Вещественный состав жильного кварца и порфириата:

a, b – жильный кварц: a – бластозерно пирита (1) с включениями халькопирита (2) и кюстелита (3),
b – катаклазированный пирит (1) с включениями халькопирита (2) и магнетита (3) (полированные шлифы);
c – самородная медь (полированный шлиф); d – измененный порфириат с вкраплениями сульфидов (штуф);
e – пирит в виде прожилков (1), халькопирит (2) в порфириите (полированный шлиф);
f – пирит в виде реликтов в лимонитизированном жильном кварце (полированный шлиф)

Fig. 3. The material composition of gangue quartz and porphyry:

a, b – gangue quartz: a – blastonodule of pyrite (1) with inclusions of chalcopyrite (2) and kustelite (3),
b – cataclased pyrite (1) with inclusions of chalcopyrite (2) and magnetite (3) (polished sections); c – native copper
(polished section); d – altered porphyry with sulfide inclusions (ore lump); e – pyrite in the form of veinlets (1),
chalcopyrite (2) in porphyrite (polished section); f – pyrite in relics form in limonitized vein quartz (polished section)

Помимо прочего были изучены вмещающие породы, представленные измененным порфириатом с вкраплениями сульфидов (рис. 3, d) и прожилками пирита (рис. 3, e), замещающегося гидроокислами железа. Изучались измененные в гипергенных условиях образцы лимонитизированного кварца (рис. 3, f), в котором пирит наблюдается в виде реликтов и широко развиты процессы окисления сульфидов с образованием гидроокислов железа (лимонита и гидрогематита).

В процентном отношении в содержании рудных минералов преобладает пирит второй генерации (20–30 % от общего количества рудных образований), несколько в меньшем количестве наблюдается пирит первой генерации (15–20 %). Халькопирит, магнетит и пирротин в совокупности составляют не менее 10–15 %.

Собственно золотоносный минерал, представленный кюстелитом, в разных образцах

присутствует в количестве от 5 до 10 %.

Самородная медь является самым редко встречающимся объектом (0–5 %). Процентное содержание гипергенных минералов варьирует от 15 до 20 %.

Анализ полученных данных позволил установить для изученного участка общую схему образования минералов, которая включает не менее трех этапов (таблица). Первый этап – магматический – характеризуется образованием пирита первой генерации. Второй этап – собственно рудный гидротермальный – представлен двумя стадиями (второй и третьей) и проявлен в формировании золото-сульфидной минерализации.

На второй стадии образовался жильный кварц двух генераций с включениями кальцита, хлорита и рудными минералами: пиритом второй генерации, халькопиритом, магнетитом, кюстелитом, которые образовались в одно время. На третьей стадии образовался



Стадийность формирования рудных минералов участка Средний Многовершинного месторождения Formation stages of ore minerals of the Sredniy site (Mnogovershinnoye field)

Минерал	Процесс			
	Магматический	Гидротермальный	Экзогенный	
	Этап I	Этап II	Стадия 3	Стадия 4
Стадия 1	Стадия 2	Стадия 3	Стадия 4	
Пирит	—	—	—	
Халькопирит		—		
Магнетит		—		
Пирротин		—		
Кюстеллит		—		
Медь самородная			—	
Гидрооксиды железа				----
Текстура	Прожилково-вкрапленная			
Структура	Гипидиоморфная	Пойкилобластовая	Дробления	Замещения

жильный кварц также с рудными минералами: пиритом, халькопиритом, магнетитом, кюстеллитом и самородной медью.

Третий этап (четвертая стадия) – экзогенный. Последующие преобразование произошло с формированием структур замещения и окисления ранее сформированных рудных минералов с образованием гидроокислов железа. В лимонитизированном кварце с включениями плагиоклаза наблюдается пирит в виде реликтов, а также тончайшие зерна халькопирита.

Многовершинное месторождение не является уникальным. Однотипный полисульфидный вещественный состав рудной ассоциации исследован на многих других объектах, например на золото-сульфидном месторождении Миндяк (Южный Урал, Россия), в котором наблюдается пирит различных генераций, а источник рудоносных флюидов установлен как магматический [9].

В рудном парагенезисе месторождения Туманного (Чукотский полуостров, Россия) присутствуют два сульфидных рудоносных комплекса в кварцевых жилах и прожилках с присутствием пирита двух генераций, арсенопирита, кюстелита [10]. Рудные тела золото-серебряного месторождения Роговик (центральная часть Охотско-Чукотского вулканического пояса, Россия) сложены кварцем, в котором самородное серебро наблюдается в ассоциации с кюстелитом, пиритом и другими минералами [11].

К полисульфидным многостадийным золоторудным месторождениям относятся также многие зарубежные объекты, например ме-

сторождения Радка (Болгария) [12] и Чартерс-Тауэрс (штат Квинсленд, северо-восток Австралии) [13]. Многостадийными полисульфидными являются золотоносные объекты металлогенической провинции Родоп (Северная Греция), которые характеризуются отложением руд в гидротермальных брекчиях и жилах [14]. В парагенезисе оруденения тектонической структуры в Биримиане (Западная Африка) золото также коррелирует с обилием сульфидов (пирит, халькопирит, арсенопирит) [15, 16]. Кроме отчетливой генетической связи рудообразующих процессов с глубинными магматическими источниками, которая характерна также и для месторождения Многовершинного [4, 7, 8], на большинстве перечисленных объектов и на ряде других устанавливается структурный контроль оруденения.

На месторождении Миндяк (Южный Урал, Россия) структурный контроль оруденения связан со сдвиговыми деформациями [9]. Золоторудная минерализация Пенджомского месторождения (Центральный пояс полуостровной Малайзии) доминирует в структурно контролируемых кварцево-карбонатных жилах, в которых наблюдается переотложение рудного вещества в пластично-хрупком режиме [17]. Структурный контроль характерен также для золоторудного месторождения Сабодала (Западная Африка) [15, 16], золотоносной сдвиговой зоны района Дунгаш (Центрально-Восточная пустыня, Египет) [18], района Бостонского золоторудного месторождения (вулканический пояс Хоуп-Бей, Нунавут, Канада) [19].



В связи с вышеизложенными данными о сложности указанных объектов на Многовершинном месторождении в целом, а также на отдельных его участках в частности для решения задачи оптимизации поисково-разведочных работ на флангах и глубоких горизонтах, по всей видимости, необходимы не только отдельные структурные или петрографические исследования, но и их взаимовыгодное совмещение с целью создания объемных структурно-вещественных моделей месторождений.

Использование таких моделей делает возможными более точные прогнозные построения, учитывающие сложность многостадийных месторождений, таких как Многовершинное и другие вышеупомянутые.

Заключение

В большинстве фондовых материалов существовали представления о трехстадийном процессе образования минералов рудной ассоциации Многовершинного месторождения. Генезис самого золотоносного оруденения связывается в большей степени с гидротермальными процессами. Анализ материалов минералого-петрографического изучения собственных отобранных образцов позволил авторам данного исследования установить четырехстадийную схему образования, в которой выделен магматический этап, предшествующий собственно рудному многостадийному гидротермальному процессу. Его вещественным выражением является наличие пирита первой генерации, не содержащего золота. Андезит-гранодиоритовая ассоциация пород месторождения характеризуется повышенной концентрацией некоторых элементов, таких как медь, серебро, железо, свинец, что,

возможно, позволило образоваться сульфидам, но золота и серы среди них нет. Значит, сера и золото участвовали в минералообразовании на последующих гидротермальных этапах.

В то же время в предложенной схеме (см. таблицу) отсутствует поздняя гидротермальная стадия, которая многими исследователями установлена на других участках рассматриваемого месторождения [4, 5, 7]. Данный факт, скорее всего, свидетельствует о том, что на отдельных участках месторождения процессы рудообразования могли протекать по собственному сценарию, отличающемуся от общего. Подобная ситуация сложилась при анализе структурно-вещественных комплексов эпимерального золото-серебряного месторождения Купол (Чукотка, Россия) [20], в результате чего была предложена новая версия генезиса, которая позволяет ожидать нахождения крупных рудных тел и богатых руд на данном объекте.

Проведенные исследования руд Многовершинного месторождения еще раз показали наличие полисульфидной многостадийной минерализации, которая развивалась в тесной связи с магматическим процессом и стала производной этой магмы. Знание стадийности образования руд является составной частью создания геолого-структурных моделей. Дальнейшие изучение структурно-вещественных комплексов месторождения может позволить существенно корректировать планы поисковых, поисково-оценочных и разведочных работ, повысить их эффективность на основании определения более точной морфологии рудных тел и их вещественного состава по отношению к выявленным этапам рудообразования.

Список источников

1. Моисеенко В. Г., Эйриш Л. В. Золоторудные месторождения Востока России. Владивосток: Дальнаука, 1996. 352 с.
2. Варгунина Н. П., Константинов М. М., Косовец Т. Н., Стружков С. Ф., Сынгаевский Е. Д., Шишакова Л. Н. Золото-серебряные месторождения. М.: Изд-во ЦНИГРИ, 2000. 239 с.
3. Золоторудные месторождения России / отв. ред. М. М. Константинов. М.: Акварель, 2010. 365 с.
4. Остапенко Н. С., Нерода О. Н. Некоторые особенности формирования месторождений золота Хаканда, Многовершинное и Белая гора (Россия) // Международный научно-исследовательский журнал. 2019. № 12-1. С. 148–153.
5. Fats'yanov I. I., Khomich V. G., Boriskina N. G. Hidden mineralogical and geochemical zonation of low-sulfide gold-silver mineralization (Mnogovershinnoe deposit, Lower Amur area) // Doklady Earth Sciences. 2010. Vol. 435. P. 1456–1459. <https://doi.org/10.1134/S1028334X10110103>.
6. Вартанян С. С., Новиков В. П. Золото-серебряные месторождения вулканоплатонических поясов // Руды и металлы. 2015. № 1. С. 14–29.
7. Khomich V. G., Boriskina N. G., Fatyanov I. I., San-



- tosh M. Characteristics and genesis of the Mnogovershinnoe gold-silver deposit, SE Russia // *Ore Geology Reviews*. 2018. Vol. 103. P. 56–67. <https://doi.org/10.1016/j.oregeorev.2017.01.017>.
8. Сластиников В. В. Структура водораздельной рудной зоны Многовершинного месторождения золота: данные по открытым горным выработкам и керну скважин // *Известия Томского политехнического университета. Инжиниринг георесурсов*. 2016. Т. 327. № 4. С. 130–141.
9. Знаменский С. Е., Мичурин С. В. Условия образования золото-сульфидного месторождения Миндяк (Южный Урал): структурные и изотопно-geoхимические аспекты // *Литосфера*. 2013. № 4. С. 121–135.
10. Baksheev I. A., Vlasov E. A., Nikolaev Y. N., Krivitskaya N. N., Koshlyakova N. N., Nagornaya E. V., et al. Mineralogy of the Tumanny Au-Ag-Te-Hg epithermal veins, Western Chukchi Peninsula, Russia // *Ore Geology Reviews*. 2018. Vol. 101. P. 293–311. <https://doi.org/10.1016/j.oregeorev.2018.06.021>.
11. Kravtsova R. G., Tauson V. L., Palyanova G. A., Makshakov A. S., Pavlova L. A. Specific composition of native silver from the Rogovik Au-Ag deposit, Northeastern Russia // *Geology of Ore Deposits*. 2017. Vol. 59. Iss. 5. P. 375–390. <https://doi.org/10.1134/S1075701517050038>.
12. Kouzmanov K., Ramboz L., Bailly L. Genesis of high-sulfidation vincinnite-bearing Cu-As-Sn (\pm Au) assemblage from the Radka epithermal copper deposit, Bulgaria: evidence from mineralogy and infrared microthermometry of enargite // *The Canadian Mineralogist*. 2004. Vol. 42. Iss. 5. P. 1501–1521. <https://doi.org/10.2113/gscanmin.42.5.1501>.
13. Kreuzer O. P., Blenkinsop T. G., Morrison R. J., Peters S. G. Ore controls in the Charters Towers goldfield, NE Australia: constraints from geological, geophysical and numerical analyses // *Ore Geology Reviews*. 2007. Vol. 32. Iss. 1-2. P. 37–80. <https://doi.org/10.1016/j.oregeorev.2006.12.001>.
14. Voudouris P., Melfos V., Vavelidis M., Arikas K. Genetic relation between the Tertiary porphyry Cu-(\pm Mo) and the epithermal Au-(\pm Ag) deposits in the Rhodope metallogenic province, Thrace region, Northern Greece // *Mineral Exploration and Sustainable Development: proceedings of the 7th Biennial SGA*. Athens, 2003. P. 541–544.
15. Dabo M., Aïfa T., Miyouna T., Diallo D. A. Gold mineralization paragenesis to tectonic structures in the Birimian of the eastern Dialé-Daléma Supergroup, Kédougou-Kéniéba Inlier, Senegal, West African Craton // *International Geology Review*. 2016. Vol. 58. Iss. 7. P. 807–825. <https://doi.org/10.1080/00206814.2015.1123121>.
16. Sylla S., Gueye M., Ngom P. M. New approach of structural setting of gold deposits in Birimian volcanic belt in West African Craton: the example of the Sabodala gold deposit, SE Senegal // *International Journal of Geosciences*. 2016. Vol. 7. Iss. 3. P. 440–458. <https://doi.org/10.4236/ijg.2016.73034>.
17. Endut Z., Ng T. H., Aziz J. H. A., Teh G. H. Structural analysis and vein episode of the Penjom gold deposit, Malaysia: implications for gold mineralisation and tectonic history in the Central Belt of Malaysia // *Ore Geology Reviews*. 2015. Vol. 69. P. 157–173. <https://doi.org/10.1016/j.oregeorev.2015.02.012>.
18. Kassem O. M. K., Abd El Rahim S. H. Finite strain analysis of metavolcanics and metapyroclastics in goldbearing shear zone of the Dungash area, Central Eastern Desert, Egypt // *Geotectonics*. 2014. Vol. 48. Iss. 6. P. 483–495. <https://doi.org/10.1134/S0016852114060041>.
19. Sherlock R. L., Sandeman H. A. Volcanic stratigraphy and structural geology of the area of the Boston gold deposit, Hope Bay volcanic belt, Nunavut // *Geological Survey of Canada*. 2004. <https://doi.org/10.4095/215377>.
20. Остапенко Н. С., Нерода О. Н. К генезису золото-серебряного месторождения Купол (северо-восток России) // *Отечественная геология*. 2020. № 4-5. С. 39–47. <https://doi.org/10.47765/0869-7175-2020-10022>.

References

1. Moiseenko V. G., Eirish L. V. *Gold deposits in the East of Russia*. Vladivostok: Dal'nauka; 1996. 352 p. (In Russ.).
2. Varginina N. P., Konstantinov M. M., Kosovets T. N., Struzhkov S. F., Syngaeuskii E. D., Shishakova L. N. *Gold and silver fields*. Moscow: Central Research Institute of Geological Prospecting for Base and Precious Metals; 2000. 239 p. (In Russ.).
3. Konstantinov M. M. *Gold deposits of Russia*. Moscow: Akvarel'; 2010. 365 p. (In Russ.).
4. Ostapenko N. S., Neroda O. N. Some features of gold deposits formation of Khakanja, Mnogovershinnoye and Belya Gora (Russia). *Mezhdunarodnyi nauchno-issledovatel'skii zhurnal = International Research Journal*. 2019;12-1:148-153. (In Russ.).
5. Fats'yanov I. I., Khomich V. G., Boriskina N. G. Hidden mineralogical and geochemical zonation of low-sulfide gold-silver mineralization (Mnogovershinnoe deposit, Lower Amur area). *Doklady Earth Sciences*. 2010;435:1456-1459. <https://doi.org/10.1134/S1028334X10110103>.
6. Vartanyan S. S., Novikov V. P. Au-Ag deposits of volcanoplutonic belts. *Rudy i metally = Ores and Metals*. 2015;1:14-29. (In Russ.).
7. Khomich V. G., Boriskina N. G., Fatyanov I. I., Santosh M. Characteristics and genesis of the Mnogovershinnoe gold-silver deposit, SE Russia. *Ore Geology Reviews*. 2018;103:56-67. <https://doi.org/10.1016/j.oregeorev.2017.01.017>.
8. Slastnikov V. V. Structure of vodorazdelnaya ore zone of Mnogovershinnoye (MNV) gold deposit: data on open surface workings and diamond drilling core. *Izvestiya Tomskogo politekhnicheskogo universiteta. Inzhiniring georesursov = Bulletin of the Tomsk Polytechnic University. Geo Assets Engineering*. 2016;327;4:130-141. (In Russ.).
9. Znamensky S. E., Michurin S. V. Conditions of formation of Mindyak gold-sulfide deposit (Southern Ural): structural and isotopic-geochemical aspects. *Litosfera = Lithosphere (Russia)*. 2013;4:121-135. (In Russ.).
10. Baksheev I. A., Vlasov E. A., Nikolaev Y. N., Krivitskaya N. N., Koshlyakova N. N., Nagornaya E. V., et al. Mineralogy of the Tumanny Au-Ag-Te-Hg epithermal



- veins, Western Chukchi Peninsula, Russia. *Ore Geology Reviews*. 2018;101:293-311. <https://doi.org/10.1016/j.oregeorev.2018.06.021>.
11. Kravtsova R. G., Tauson V. L., Palyanova G. A., Makshakov A. S., Pavlova L. A. Specific composition of native silver from the Rogovik Au-Ag deposit, Northeastern Russia. *Geology of Ore Deposits*. 2017;59(5):375-390. <https://doi.org/10.1134/S1075701517050038>.
 12. Kouzmanov K., Ramboz L., Bailly L. Genesis of high-sulfidation vinciennite-bearing Cu-As-Sn (\pm Au) assemblage from the Radka epithermal copper deposit, Bulgaria: evidence from mineralogy and infrared microthermometry of enargite. *The Canadian Mineralogist*. 2004;42(5):1501-1521. <https://doi.org/10.2113/gscanmin.42.5.1501>.
 13. Kreuzer O. P., Blenkinsop T. G., Morrison R. J., Peters S. G. Ore controls in the Charters Towers goldfield, NE Australia: constraints from geological, geophysical and numerical analyses. *Ore Geology Reviews*. 2007;32(1-2):37-80. <https://doi.org/10.1016/j.oregeorev.2006.12.001>.
 14. Voudouris P., Melfos V., Vavelidis M., Arikas K. Genetic relation between the Tertiary porphyry Cu-(\pm Mo) and the epithermal Au-(\pm Ag) deposits in the Rhodope metallogenic province, Thrace region, Northern Greece. In: *Mineral Exploration and Sustainable Development: proceedings of the 7th Biennial SGA*. Athens; 2003, p. 541-544.
 15. Dabo M., Aïfa T., Miyouna T., Diallo D. A. Gold mineralization paragenesis to tectonic structures in the Birimian of the eastern Dialé-Daléma Supergroup, Kédougou-Kéniéba Inlier, Senegal, West African Craton. *International Geology Review*. 2016;58(7):807-825. <https://doi.org/10.1080/00206814.2015.1123121>.
 16. Sylla S., Gueye M., Ngom P. M. New approach of structural setting of gold deposits in Birimian volcanic belt in West African Craton: the example of the Sabodala gold deposit, SE Senegal. *International Journal of Geosciences*. 2016;7(3):440-458. <https://doi.org/10.4236/ijg.2016.73034>.
 17. Endut Z., Ng T. H., Aziz J. H. A., Teh G. H. Structural analysis and vein episode of the Penjom gold deposit, Malaysia: implications for gold mineralisation and tectonic history in the Central Belt of Malaysia. *Ore Geology Reviews*. 2015;69:157-173. <https://doi.org/10.1016/j.oregeorev.2015.02.012>.
 18. Kassem O. M. K., Abd El Rahim S. H. Finite strain analysis of metavolcanics and metapyroclastics in goldbearing shear zone of the Dungash area, Central Eastern Desert, Egypt. *Geotectonics*. 2014;48(6):483-495. <https://doi.org/10.1134/S0016852114060041>.
 19. Sherlock R. L., Sandeman H. A. Volcanic stratigraphy and structural geology of the area of the Boston gold deposit, Hope Bay volcanic belt, Nunavut. In: *Geological Survey of Canada*. 2004. <https://doi.org/10.4095/215377>.
 20. Ostapenko N. S., Neroda O. N. On the genesis of the gold-silver deposit Kupol (north-east of Russia). *Otechestvennaya Geologiya = National Geology*. 2020;4-5:39-47. <https://doi.org/10.47765/0869-7175-2020-10022>.

Информация об авторах / Information about the authors



Мальцева Галина Дмитриевна,
кандидат геолого-минералогических наук, доцент,
профессор кафедры прикладной геологии,
геофизики и геоинформационных систем,
Институт недропользования,
Иркутский национальный исследовательский технический университет,
г. Иркутск, Россия,
galmalceva47@yandex.ru.

Galina D. Mal'tseva,
Cand. Sci. (Geol. & Mineral.), Associate Professor,
Professor of the Department of Applied Geology,
Geophysics and Geoinformation Systems,
Institute of Subsoil Use,
Irkutsk National Research Technical University,
Irkutsk, Russia,
galmalceva47@yandex.ru.



Яхно Марина Владиславовна,
старший преподаватель кафедры прикладной геологии,
геофизики и геоинформационных систем,
Институт недропользования,
Иркутский национальный исследовательский технический университет,
г. Иркутск, Россия,
ymar@istu.edu.

Marina V. Yakhno,
Senior Lecturer of the Department of Applied Geology,
Geophysics and Geoinformation Systems,
Institute of Subsoil Use,
Irkutsk National Research Technical University,
Irkutsk, Russia,
ymar@istu.edu.



Иванова Раиса Николаевна,
кандидат геолого-минералогических наук, доцент,
доцент кафедры прикладной геологии,
геофизики и геоинформационных систем,
Институт недропользования,
Иркутский национальный исследовательский технический университет,
г. Иркутск, Россия,
ivanova_rn@ex.istu.edu.

Raisa N. Ivanova,
Cand. Sci. (Geol. & Mineral.), Associate Professor,
Associate Professor of the Department of Applied Geology,
Geophysics and Geoinformation Systems,
Institute of Subsoil Use,
Irkutsk National Research Technical University,
Irkutsk, Russia,
ivanova_rn@ex.istu.edu.



Буруева Галина Николаевна,
геолог первой категории,
СН Голд Майнинг-Кыра – обособленное подразделение ООО «СН Голд Майнинг»,
с. Кыра, Россия,
burueva.galya@yandex.ru.

Galina N. Burueva,
1st Category Geologist,
SN Gold Mining-Kyra – a separate division of LLC SN Gold Mining,
Kyra settlement, Russia,
burueva.galya@yandex.ru.

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

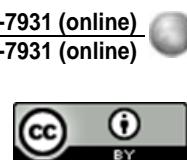
Авторы заявляют об отсутствии конфликта интересов.
The authors declare no conflicts of interests.

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 17.06.2022; одобрена после рецензирования 22.07.2022; принятая к публикации 25.08.2022.

The article was submitted 17.06.2022; approved after reviewing 22.07.2022; accepted for publication 25.08.2022.

**Научная статья****УДК 551.351**<https://doi.org/10.21285/2686-9993-2022-45-3-246-264>

Биогермы Божеханского поднятия Предбайкальского прогиба – краевой барьерно-рифовой системы кембрийского соленосного бассейна юга Сибирской платформы

Андрей Гелиевич Вахромеев^{a,b}, Татьяна Александровна Корнилова^a,

Наталья Викторовна Мисюркеева^a, Роман Сергеевич Уренко^a,

Аркадий Михайлович Станевич^a, Наталья Ивановна Степанова^a,

Максим Сергеевич Пуляевский^{b,c}

^a*Институт земной коры СО РАН, г. Иркутск, Россия*

^b*Иркутский национальный исследовательский технический университет, г. Иркутск, Россия*

^c*АО «Верхнечонскнефтегаз»,*

Автор, ответственный за переписку: Вахромеев Андрей Гелиевич, andrey_jgp@mail.ru

Резюме. В настоящее время прогноз, разведка и освоение залежей и месторождений углеводородов в природных карбонатных резервуарах погребенных биогермных (рифовых) построек на севере Иркутской области и в Республике Саха (Якутия) в пределах Непско-Ботубинской антеклизы базируются на самых современных технологиях объемных 3D сейсморазведочных работ, а также электроразведки с набором новых интерпретационных подходов и атрибутов анализа в сопровождении широкого комплекса геофизических исследований скважин. На фоне новых открытий углеводородных месторождений в рифах северных территорий забыты биогермные объекты на юге Иркутского амфитеатра. Цель представленной работы – геологическое изучение биогермных карбонатных толщ нижнекембрийского возраста в обнажениях Божеханского мегавала в Прибайкалье. Выбор данного объекта исследования обусловлен тем, что первые притоки нефти и газа были получены в скважинах Атовской, Осинской, Биркинской, Христофоровской, Балыхтинской, Тутурской площадей. Проведены полевые геологические маршруты и камеральная обработка данных по распилам и пришлифованным поверхностям образцов, произведены микроскопические исследования в шлифах образцов и архивных коллекций керна глубоких нефтегазопоисковых скважин. В геологических маршрутах 2021–2022 гг. на юге Иркутского амфитеатра по обнажениям кембрийских карбонатных пород в пределах сложнопостроенного Божеханского мегавала авторами данного исследования изучены пластовые, желваковые и столбчатые строматолиты. Широко представленные на выделенной территории карбонатные внутриинформационные осадочные брекчии весьма разнообразны по размерам обломков и включений. Особенности внутреннего строения строматолитов изучены по распилам и пришлифованным поверхностям образцов. В шлифах также выявлены и описаны микрофитолиты. Ко всему прочему, авторам представилась возможность изучить архивную коллекцию шлифов керна, отобранного из карбонатных толщ венда – кембрия и нижнего кембрия Ахинских скважин в районе Божеханского мегавала и северо-западнее, в области Верхнеленского поднятия. В результате проведенного исследования можно полагать, что обнаженные участки биогермов кембрия Божеханского велообразного поднятия Предбайкальского прогиба в определенном смысле являются эталонными геологическими объектами. Изучение биологического и генетического разнообразия фитолитов нижнего кембрия, диагностических признаков органогенных сооружений, их внутреннего строения, процессов формирования рифовой экосистемы может быть своеобразным регионально-прогнозным ключом к исследованию строения кембрийской осадочной системы юга Сибирской платформы.

Ключевые слова: Предбайкальский прогиб, нижний кембрий, биоморфные карбонаты, строматолиты, фитолиты, биогермы, окремнение

Финансирование: Подготовка данных выполнена в рамках научно-исследовательской работы по проекту № 0280-2021-0008, а также гранта № 075-15-2021-682. Частично задействовано оборудование Центра коллективного пользования «Геодинамика и геохронология» Института земной коры СО РАН (поляризационный микроскоп Olympus BX41).

Для цитирования: Вахромеев А. Г., Корнилова Т. А., Мисюркеева Н. В., Уренко Р. С., Станевич А. М., Степанова Н. И. [и др.]. Биогермы Божеханского поднятия Предбайкальского прогиба – краевой барьерно-рифовой системы кембрийского соленосного бассейна юга Сибирской платформы // Науки о Земле и недропользование. 2022. Т. 45. № 3. С. 246–264. <https://doi.org/10.21285/2686-9993-2022-45-3-246-264>.

© Вахромеев А. Г., Корнилова Т. А., Мисюркеева Н. В., Уренко Р. С., Станевич А. М., Степанова Н. И., Пуляевский М. С., 2022



Original article

Bioherms of the Bozhekhan uplift in the Cis-Baikal trough as a marginal barrier reef system of a Cambrian salt basin of the southern Siberian platform

Andrey G. Vakhromeev^{a,b}, Tatiana A. Kornilova^a, Natalia V. Misurkeeva^a, Roman S. Urenko^a, Arkadiy M. Stanevich^a, Natalia I. Stepanova^a, Maksim S. Pulyaevskiy^{b,c}

^aInstitute of the Earth's Crust, Siberian Branch of the Russian Academy of Sciences, Irkutsk, Russia

^bIrkutsk National Research Technical University, Irkutsk, Russia

^cVerkhnechonskneftegaz JSC, Irkutsk, Russia

Corresponding author: Andrey G. Vakhromeev, andrey_igp@mail.ru

Abstract. Modern forecast, exploration and development of hydrocarbon deposits within natural carbonate reservoirs of buried bioherm (reef) structures in the north of the Irkutsk region and the Sakha Republic (Yakutia) areas within the Nepa-Botuoba Anticline apply the most advanced technologies of 3D seismic exploration and geoelectric prospecting supplemented with a set of new interpretation approaches and analysis attributes contrasted against wide range of well logging data. The recent discoveries of hydrocarbon deposits in the northern reefs shoved the bioherms of the Irkutsk amphitheater in the shadow. The purpose of this research is geological study of biohermal carbonate formations of the Lower Cambrian age in the outcrops of the Bozhekhan megaswell in the Baikal region. The choice of this object of study is due to the fact that the first oil and gas inflows were obtained from the wells of the Atovskaya, Osinskaya, Birkinskaya, Khristoforovskaya, Balyktinskaya and Tuturskaya areas. Field geological routes and office processing of data on cuts and polished thin sections of sample surfaces were carried out including microscopic studies in the thin sections of samples and archival collections of cores from deep oil and gas prospecting wells. In 2021–2022, while prospecting in the south of the Irkutsk amphitheater, the authors explored stratified, nodular and columnar stromatolites found within the compound Bozhekhan megaswell of Cambrian carbonate outcroppings. Carbonate intraformational sedimentary breccias identified in the area under investigation feature a great variety in their fragment sizes and inclusions. The stromatolites' structural features were studied by the cuts and polished thin sections of sample surfaces. Microphytolites were found in the thin sections and described. The authors also took advantage of the opportunity to study an archive collection of the thin sections of Vend-Cambrian and Lower Cambrian carbonate strata from the Akhinskaya area's wells at the Bozhekhan megaswell and from the Upper-Lena uplift to the north-west. The conducted study implies that Cambrian bioherm outcroppings of the Bozhekhan megaswell-type uplift within the Cis-Baikal trough are, in a sense, model geologic objects. The study of biologic and genetic varieties of Lower Cambrian phytolites, diagnostic features of the organogenic structures, their inner structure and formation processes of the reef ecosystem may provide a region-level prognostic key to the research of Cambrian sediment system in the south of the Siberian platform.

Keywords: Cis-Baikal trough, Lower Cambrian, biomorphic carbonates, stromatolites, phytolites, bioherms, silification

Funding: The data were prepared within the framework of the research work under the project no. 0280-2021-0008, and the grant no. 075-15-2021-682. The equipment of the Research Equipment Sharing Center "Geodynamics and Geochronology" of the Institute of the Earth's Crust of the Siberian Branch of the Russian Academy of Sciences (Olympus BX41 polarization microscope) was partially used.

For citation: Vakhromeev A. G., Kornilova T. A., Misurkeeva N. V., Urenko R. S., Stanevich A. M., Stepanova N. I., et al. Bioherms of the Bozhekhan uplift in the Cis-Baikal trough as a marginal barrier reef system of a Cambrian salt basin of the southern Siberian platform. *Nauki o Zemle i nedropol'zovaniye = Earth sciences and subsoil use*. 2022;45(3):246-264. (In Russ.). <https://doi.org/10.21285/2686-9993-2022-45-3-246-264>.

Введение

Геологическое строение карбонатных толщ в краевых областях Восточно-Сибирского солеродного мегабассейна более века вызывает повышенный интерес у геологов – примерами тому могут служить известные ра-

боты В. А. Обручева 1892, 1897, 1935 гг. [1 и др.]. В толще нижнекембрийских осадочных отложений юга Сибирской платформы более 80 % разреза представляют первично карбонатные осадки^{1,2}. Карбонатные горизонты и разделяющие их толщи представлены раз-

¹ Шашин С. Г., Комарова Н. И., Неустроев В. Л. Методические рекомендации по комплексной оценке карбонатных коллекторов при подсчете запасов нефти и газа в залежах Восточной Сибири. Иркутск: Изд-во ВостСибНИИГиМС, 1991. 112 с.

² Шашин С. Г., Буддо Л. А., Комарова Н. И., Ильин А. С., Винокуров В. Ф. Рекомендации по исследованию пород-коллекторов нефтегазоносных горизонтов Иркутского амфитеатра. Иркутск: Изд-во ВостСибНИИГиМС, 1977. 60 с.



личными генетическими типами карбонатных, галогенных и сульфатно-карбонатных пород [2, 3 и др.], отложение которых шло в бассейнах с морским или эвапоритовым режимом осадконакопления в различных фациальных зонах, последовательно сменявшихся в разрезе и пространстве. По условиям седиментации в разрезе выделяются органогенные, обломочные и хемогенные доломиты.

На региональных стадиях изучения кембрийских толщ органогенные карбонаты (точнее, микрофитолиты и остатки скелетной фауны) рассматривались как индикаторы возраста при разработке стратиграфических схем³ [4–7 и др.]. «Биогенной же инситной природе материала и его активной роли в строительстве подводного рельефа» [3, с. 67] детального внимания не уделялось. Сегодня доказано «формирование многочисленных» бассейнов – «и открыто морских, и закрыто-шельфовых (в их числе Иркутский, Непский и другие), разделенных карбонатными платформами» [3, с. 66], вместо одного [2, 8] эпиконтинентального. Принципиально также положение о существовании на территории юга Сибирской платформы в кембрии не только отдельных органогенных построек, но и краевых барьерно-рифовых систем, типичных для карбонатных бассейнов мира, «формирование толщ в режимах и динамике, поразительно сходной для разных континентов во все времена геологической истории» [3, с. 77]. По мере роста изученности кембрийского разреза гигантского Восточно-Сибирского солеродного мегабассейна формируется и новое представление об эволюции в кембрии окраин его замыкания. С акцентом на северные территории платформы активно развиваются новые подходы и геологические модели формирования биогермных построек⁴ [3, 9–14 и др.], formalizованные по данным современных объемных сейморазведочных работ, электроразведки и бурения, а также методология реконструкции фациально-седимента-

ционной зональности кембрийских отложений [14].

Это веское основание вернуться к геологогеофизическим материалам и результатам структурного и нефтегазопоискового бурения прошлых лет на юге, в пределах южного фаса Верхнеленского поднятия Иркутского амфитеатра [15–18], где бурением были вскрыты первые на Сибирской платформе органогенные карбонатные коллекторы (Атовка, Христофорово, Ахины). Здесь, в краевой области юга Сибирской платформы, в 60-е годы XX века глубоким бурением установлено системное обессоливание разреза нижнего кембрия. Многие исследователи [5, 6, 19–22 и др.] трактовали это явление как фациальный переход кембрийских галогенно-карбонатных толщ в карбонатные посредством фациального замещения, смещения палеогеографических условий осадконакопления. Восточная граница фациального замещения разделяла области замкнутых лагун и открытого морского бассейна, области повышенной и пониженной солености. Такой разделяющей, барьерной структурой в краевой зоне Иркутского амфитеатра является Божеханская линейная поднятие, или мегавал (рис. 1, а), сформированный в осадочных толщах венда и нижнего кембрия и вскрытый бурением скважин Каменских 1, 2, Божеханская-1. Это самая крупная линейная положительная структура южной части внешнего крыла Ангаро-Ленского палеопротиба [5] в осадочном чехле. Согласно И. К. Королюк, «...в нижнем кембрии произошло резкое расчленение Восточно-Сибирского бассейна на два: нормально морской и западный – осолоненный» [19], что подтверждается резким различием микропроблематики.

Как пограничная линейная структура, достоверно выявленная бурением не только кембрийских отложений, но и отложений терригенного венда⁵ [6, 24], Божеханский мегавал (или антиклинал) протягивается от окрестностей

³ Титоренко Т. Н., Анисимова С. А., Анисимов А. Ю. Палеонтология докембрия. Фитолиты (строматолиты и микрофитолиты): учеб.-метод. пособие. Иркутск: Изд-во ИГУ, 2012. 117 с.

⁴ Китаева И. А. Типы и генезис фильтрационно-емкостного пространства пород-коллекторов нижнекембрийских карбонатных отложений юго-западного склона Непско-Ботубинской антеклизы: дисс. ... канд. геол.-минерал. наук: 25.00.06. М., 2020. 179 с.

⁵ Старосельцев В. С., Мельников Н. В., Гришин М. П. [и др.]. Тектоническая карта нефтегазоносных провинций Сибирской платформы. М-б 1:5000000. Новосибирск: Изд-во СНИИГГиМС, 2012.

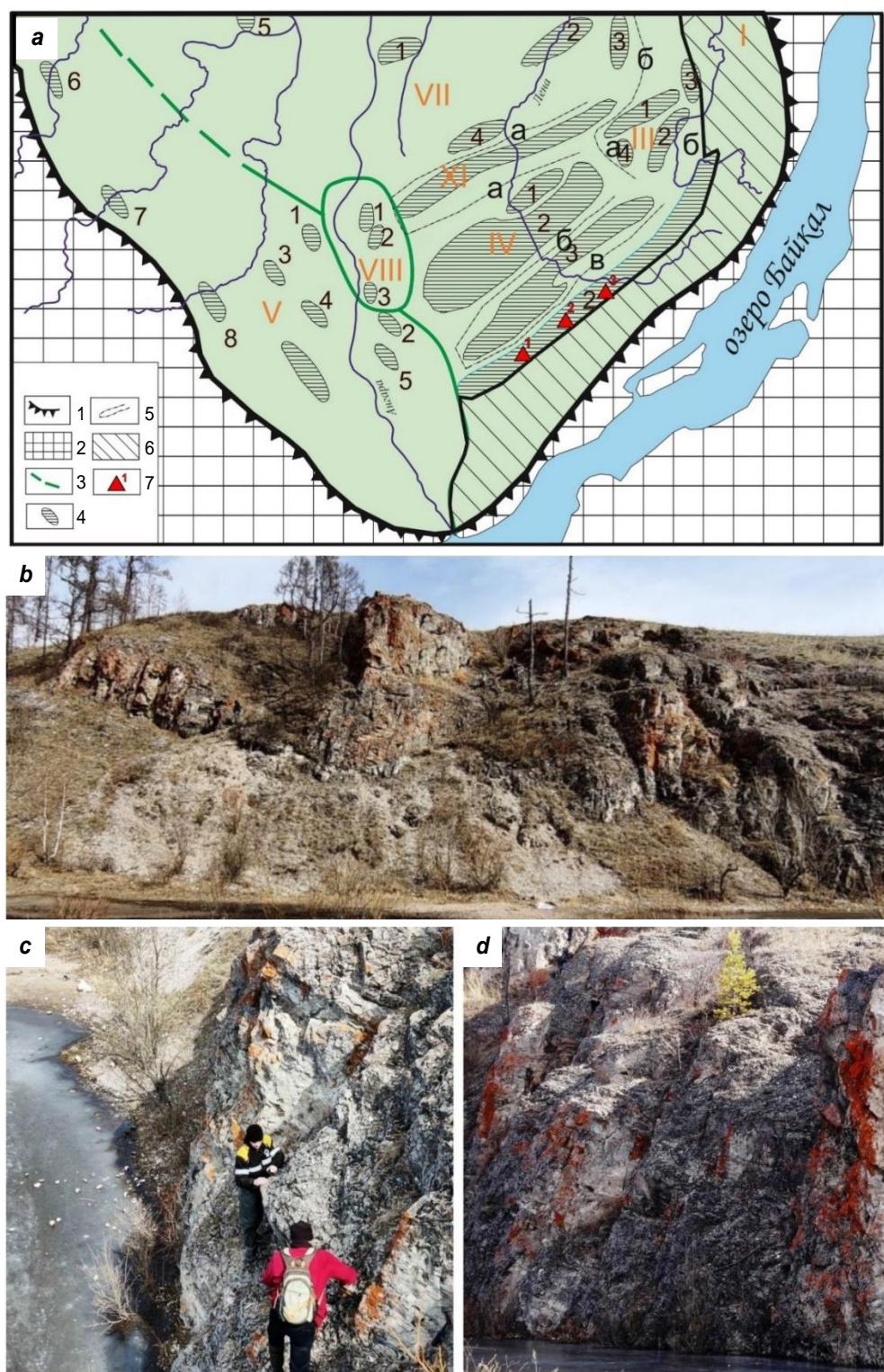


Рис. 1. Объект исследования:

а – выкопировка из схемы структурно-тектонического районирования юга Сибирской платформы по соленосному и надсоленосному комплексам осадочного чехла, Божеханский мегавал (2) на юго-востоке Ангаро-Ленского палеопрогиба как ограничение солеродного бассейна, масштаб 1:3000000: 1 – граница современного сплошного распространения осадочных отложений, 2 – Саяно-Байкальская граница, 3 – граница структурных зон, 4 – ветви антиклинальных складок, валов и отдельных антиклинальных поднятий, 5 – оси прогибания, 6 – Предбайкальский прогиб, 7 – участки полевых маршрутов (1 – Каменский, 2 – Манзурско-Кырминский, 3 – Лено-Илкитинский) [5, 20, 23]; б – биогермная постройка в толще ангарской и литвинцевской свит в обнажении юго-восточного крыла Божеханского мегавала, Каменский участок; в – геологический маршрут; г – столбчатые строматолиты («столбы») в составе биогермного массива (фото А. Г. Вахромеева)

***Fig. 1. Object of study:***

a – an extract from the scheme of structural-tectonic zoning of the south of the Siberian platform along the salt-bearing and suprasalt-bearing complexes of the sedimentary cover, the Bozhekhansky megaswell (2) in the southeast of the Angara-Lena paleotrough as a limitation of the salt basin, scale 1:3000000: 1 – boundary of the modern continuous distribution of sedimentary deposits, 2 – Sayano-Baikal boundary, 3 – boundary of structural zones, 4 – branches of anticlinal folds, swells and individual anticlinal uplifts, 5 – axes of subsidence, 6 – Cis-Baikal depression, 7 – sections of field routes (1 – Kamensky, 2 – Manzursko-Kyrminsky, 3 – Lena-Ilyktinsky) [5, 20, 23]; b – bioherm edifice within the Angara and Litvintsevskaya formations in the outcrop of the southeastern flank of the Bozhekhansky megaswell, Kamensky site; c – geological route; d – columnar stromatolites (“pillars”) within the bioherm massif (photos by A. G. Vakhromeev)

пос. Усть-Орда на северо-восток за р. Лену на расстояние более чем 300 км при ширине около 10 км [20, 21, 23, 24], он также изучен региональным профилем «Ковыкта – Предпатор» [25] через Шонский лицензионный участок.

Поднятие имеет ширину от 5 до 30 км, амплитуду в 500–800 м, реже до 1000 м, очень крутые (до 90°) углы падения в осевой зоне и более пологие (10–15°) на крыльях. В сводовой части оно расчленяется на ряд линейных или куполовидных структур, сформированных в доюрское время. До ранней юры они были денудированы, глубина денудационного среза составила более 1000 м [21]. На геологических картах это поднятие проявляется выходами пород нижнего кембрия (рис. 1, *b-d*) среди поля развития отложений средне-верхнекембрийского, юрского и третично-четвертичного возраста.

Юго-восточнее поднятия расположена протяженная синклиналь, распадающаяся на ряд пологих относительно крупных впадин и отделяющая Божеханское поднятие от зоны сплошной мелкой линейной складчатости Прибайкалья.

В литературе Божеханская структура известна под разными названиями: вал [26], сводовое поднятие [27], валообразное поднятие [26], антиклиниорий [28], антиклиналь [29], поднятие [19]. Поднятие проявляется выходами пород нижнего кембрия (нижняя часть ангарской свиты) среди отложений верхнекембрийского, юрского и третично-четвертичного времени. По морфологическим особенностям структура разделена на четыре крупных участка [19]: Лено-Иллуктинский, Манзурско-Кырминский, Каменский, Кудинский, которые названы по соответствующим рекам, секущим их почти вкrest простирания. Территория осадочного чехла к северо-востоку от Божехан-

ского поднятия, «зажатая» двумя протяженными мегавалами – Божеханским и Жигаловским, была обособлена в Верхнеленскую (Качугскую) структурную зону. Согласно В. Б. Мазуру [24], Е. А. Адамову и др. [30], М. А. Жаркову и Э. И. Чечелю [5], здесь выделяется крупная Илгинская палеовпадина, ограниченная с севера Жигаловским, а с юга Божеханским валами и выполненная в поверхностной части верхнекембрийскими красноцветами, смытыми в мелкие удлиненные куполовидные складки.

Материалы и методы исследования

Идея комплексирования детальных полевых исследований кембрийских отложений по естественным обнажениям в Предбайкальском краевом прогибе, данных сейсмического профилирования и анализа материалов глубокого поисково-разведочного бурения была реализована геологами-нефтяниками в Иркутском амфитеатре уже в 50–60-х годах XX века на достижимом в те годы уровне технологий геологической разведки. Итогом такого действительно комплексного подхода стали первые притоки углеводородов в скважинах Атовской, Радуйской, Осинской площадей и открытие первых залежей (Балыхта, Атовка, Христофорово) и месторождений (Верхне-Марково) нефти и газа в карбонатных природных резервуарах нижнего кембрия.

В одной из работ И. К. Королюк сказано следующее: «Особенностью южной половины Божеханского поднятия является широкое развитие здесь мелких онкоидов. Онкоиды в массовом количестве встречаются на крыльях и сводах отдельных куполовидных поднятий. Иногда они располагаются вблизи друг друга, иногда в виде одиночных, рассеянных построек. Большое количество онкоидов в



районе наталкивает на мысль, не могут ли быть отдельные крупные куполовидные структуры, описанные выше, рифогенными, а не тектоническими» [19]. На основании исследований и выводов И. К. Королюк [6, 19, 31, 32], а также собственных исследований карбонатных пород докембрия и кембрия в обнажениях и в шлифах авторами настоящей статьи было сформулировано предположение о том, что и осевая часть Ахинского вала с венда – кембрия, сопредельного Божеханскому, также была положительной структурной формой – выступом, на котором периодически формировались органогенные коллекторы, в том числе постройки барьерного рифового типа (рис. 2, см. рис. 1, b–d). Ведь по данным геолого-разведочных работ прошлых лет в осинском, христофоровском, биркинском, биль-

чирском и келорском горизонтах нижнего кембрая органогенные карбонатные породы-коллекторы имеют широкое распространение на территории Иркутского амфитеатра (скважины в пос. Ахины, Бильчир, Бирка, Радуй, Христофорово, Атовка). Вероятно, что в этот период в кембрийском солеродном бассейне были отдельные участки мелкого моря [23, 30, 33, 34]. Подобное явление описано для Непско-Ботубинской антеклизы⁶ [2, 9, 35, 36], где разведочным бурением вскрыты органогенные карбонатные коллекторы и шлейфы их разрушения в преображенском, усть-кутском и осинском горизонтах. Сегодня это высокоперспективные объекты геолого-разведочных работ и нефтедобычи, поисково-разведочные работы сориентированы на выявление и локализацию таких построек.

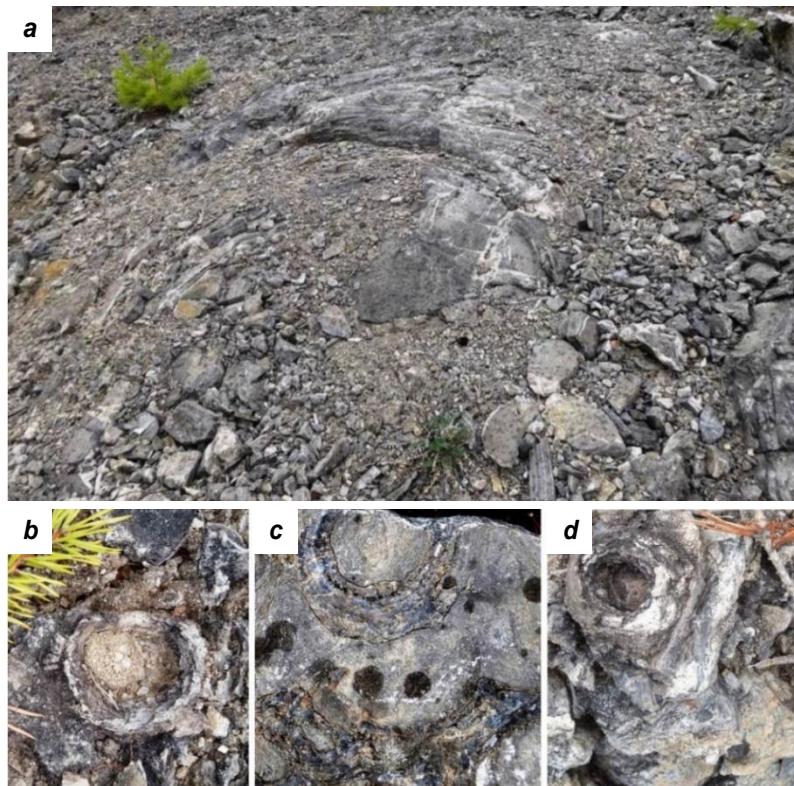


Рис. 2. Фрагмент Кырминско-Манзурского участка одной из строматолитовых построек Божеханского вала:

a – купол крупного онкоида (калиптра) ангарской свиты нижнего кембрая с выраженной концентрической слоистостью; b–d – выветрелые, частично окремненные фрагменты строматолитов *Conophyton* (?), ангарская свита (фото А. Г. Вахромеева)

Fig. 2. Fragment of the Kyrminsky-Manzursky site of one of the stromatolite structures of the Bozhekhanovsky swell:

a – dome of a large oncoid (calyptra) of the Angara Formation of the Lower Cambrian with a pronounced concentric layering; b–d – weathered, partially silicified fragments of stromatolites *Conophyton* (?); the Angara Formation (photos by A. G. Vakhromeev)

⁶Старосельцев В. С., Мельников Н. В., Гришин М. П. [и др.]. Тектоническая карта нефтегазоносных провинций Сибирской платформы. М-б 1:5000000. Новосибирск: Изд-во СНИИГГиМС, 2012.



Результаты исследования

В течение 2018–2022 гг. авторам работы удалось организовать изучение ряда нижнекембрийских обнажений Божеханского вала в полевых геологических маршрутах. Один из объектов полевых исследований показан на рис. 1, *b–d*. Исследованы и описаны в обнажениях биогермные постройки ангарской и литвинцевской свит (нерасчлененные) нижнего кембра, представленные водорослевыми карбонатами – известняками, доломитами, окремненными фрагментами, а также сингенетическими (конседиментационными) осадочными брекчиями. Строматолитовые карбонаты формируют различные по морфологии тела – пластовые, желваковые и кара-ваеобразные – с диаметром шляп до 1,5–2 м и более (см. рис. 1, *d*, рис. 2, *a*). Фото крупного локального караваеобразного онкоида (термин И. К. Королюк) или калиптра (термин И. Т. Журавлевой) приведено на рис. 2, *a*.

По результатам полевых маршрутов в биогермных постройках подтверждено значительное количество сложнопостроенных строматолитовых пород, изучены и описаны ха-

рактерные зоны: зона склона, предрифовая зона, представленная карбонатными внутриформационными брекчиями, собственно биогерма и зарифовая зона [37]. Каждая из этих зон охарактеризована представительными образцами прослоев и гнезд онколитов (термин И. К. Королюк), часто окремненных (рис. 3). Водорослевые известняки и доломиты детально описаны в работах И. К. Королюк [6, 19, 31, 32], Т. А. Дольник [4, 38], И. Т. Журавлевой 1964 [39], В. П. Маслова [40–42] и других исследователей. В геологических маршрутах 2021–2022 гг. авторами представленной статьи установлены строматолиты пластовые, желваковые, столбчатые. Широко развиты процессы окремнения строматолитовых построек нескольких стадий (см. рис. 2, 3) и отдельных прослоев, кальцитизации, вторичной трещиноватости. На рис. 3 приведены фотографии строматолитовых и микрофитолитовых карбонатов из обнажений Божеханского поднятия, «отпрепарированных» выветриванием, в палеоплане (см. рис. 3, *a, d*) и в разрезе (см. рис. 3, *b, c, e*). Для данных карбонатов характерно частичное окремнение.

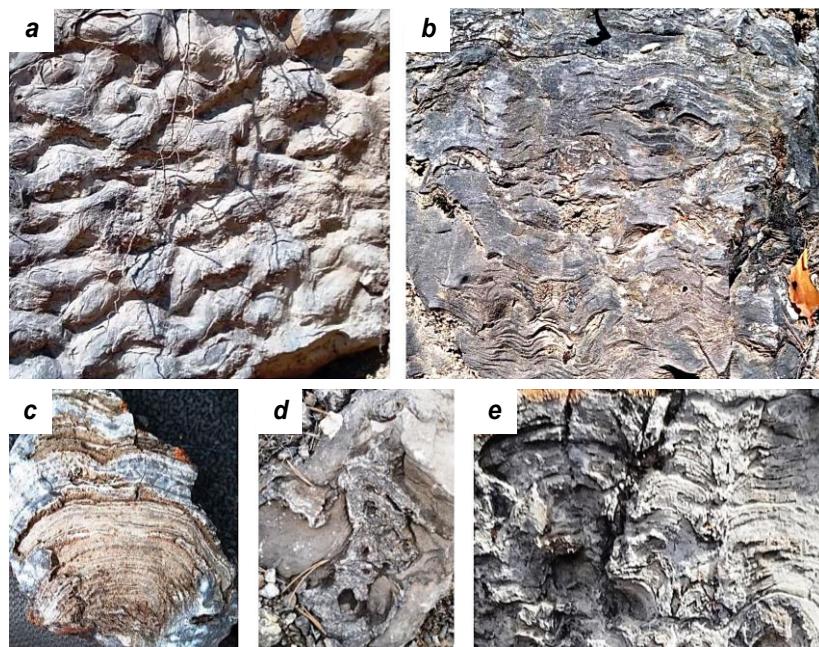


Рис. 3. Строматолитовые и микрофитолитовые карбонаты из обнажений Божеханского поднятия с частичным окремнением, «отпрепарированные» выветриванием

Участки Божеханского вала: *a, b* – Илкитинский; *c, d* – Манзурско-Кырминский; *e* – Каменский
(фото А. Г. Вахромеева)

Fig. 3. Stromatolitic and microphytolithic carbonates from the outcrops of the Bozhekhan uplift with partial silicification, which are "prepared" by weathering

Sites of the Bozhekhan swell: *a, b* – Ilkintinsky; *c, d* – Manzursko-Kyrminsky; *e* – Kamensky
(photos by A. G. Vakhromeev)



Практически в каждом геологическом маршруте в массиве обнажения наблюдаются участки залегания брекчированных пород, представленные осадочными карбонатными брекчиями (рис. 4). На некоторых обнажениях брекции крупнообломочные и даже с гигантскими обломками. В других обломки мелкие, до 0,5 см, и остроугольные, такими брекчиями сложены значительные по площади «поля». Карбонатные внутриформационные брекции (см. рис. 4) весьма разнообразны по размерам обломков и включений. В то же время они однотипны на территории всего мегавала. Встречены зоны кальцитизации пустотного пространства с цементацией обломков кристаллическим кальцитом от белоснежно-белого до желтоватого оттенков (см. рис. 4, с).

Следующий этап исследований включает изучение внутреннего строения строматолитов и микрофитолитов по распилам и пришли-

фованным поверхностям образцов, изготовление шлифов. Исследование микрофитолитов⁷ [7, 41–45] позволяет оценить пордообразующую роль этих органических остатков, ведь «роль биогенного фактора в образовании микрофитолитов признается большинством исследователей»⁸. По мнению Т. А. Дольник, микрофитолиты «...по своему происхождению <...> близки к строматолитам, однако в отличии от последних являются не прикрепленными к субстрату постройками синезеленых водорослей и бактерий», «микрофитолиты, как и строматолиты, относят к "строительям" биогерм» [4].

На рис. 5 представлены фотографии шлифов с поляризационного микроскопа Olympus BX41 типичных групп микрофитолитов из образцов в зоне развития столбчатых строматолитов с разной морфологией столбиков (коническая, кубовая), отобранных из биогермной

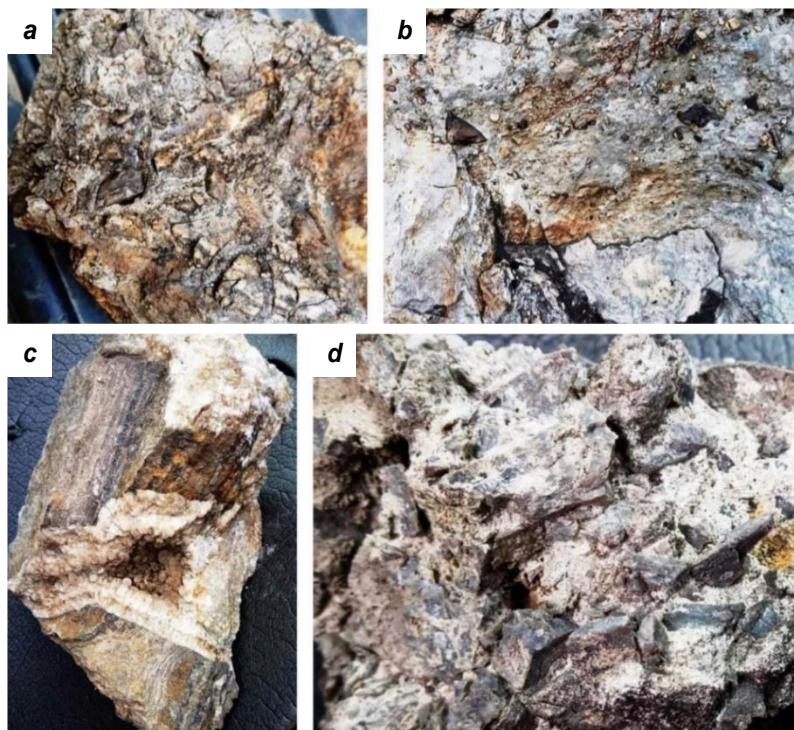


Рис. 4. Карбонатные разнообломочные сингенетичные брекции, область разрушения биогермов:
а, б, д – внутриформационные брекции; с – кальцитизация пустотного пространства
(фото А. Г. Вахромеева)

Fig. 4. Carbonate heteroclastic syngenetic breccias, area of bioherm destruction:
a, b, d – intraformation breccias; c – void space calcification
(photos by A. G. Vakhromeev)

⁷ Рейтлингер Е. А. Атлас микроскопических органических остатков и проблематики древних толщ Сибири. М.: Изд-во АН СССР, 1959. 62 с.

⁸ Титоренко Т. Н., Анисимова С. А., Анисимов А. Ю. Палеонтология докембрия. Фитолиты (stromatolites and microfilitolites): учеб.-метод. пособие. Иркутск: Изд-во ИГУ, 2012. 117 с.

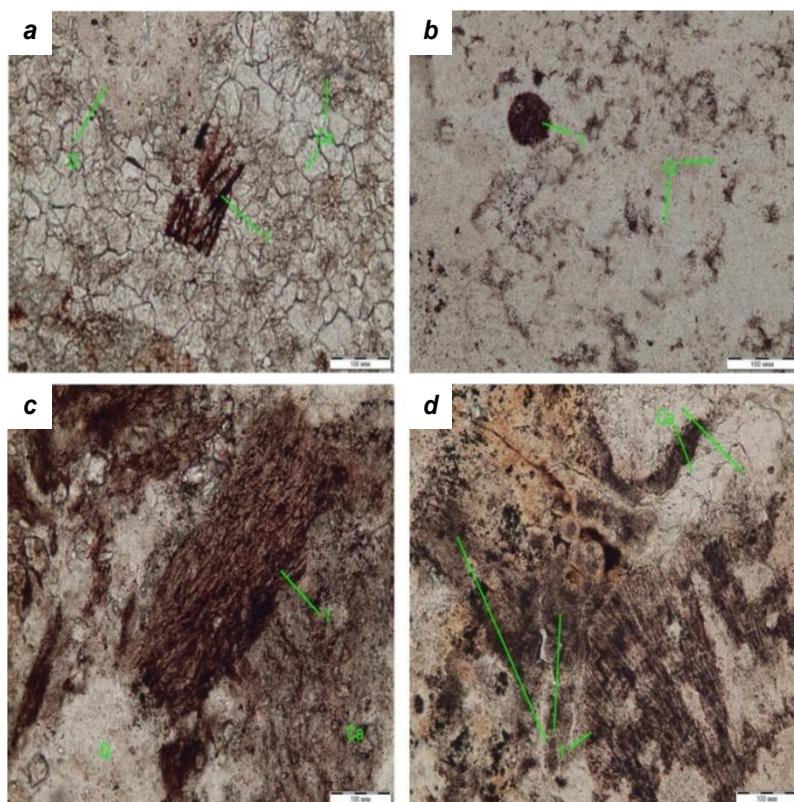


Рис. 5. Микропроблематика в шлифах из образцов, отобранных в зоне развития столбчатых строматолитов *Conophyton* (?) из биогермной постройки Каменского участка Божеханского мегавала:
a – шлиф 2: Q – халцедоновидный кварц, Ca – кальцит, 1 – нитчатая микрофоссилия *Obruchevella aff. inviolate* в карбонатном слойке строматолита; b – шлиф 7: Q – халцедоновидный кварц, 1 – микрофоссилия *Leiosphaeridia* sp.; c – шлиф 9: Q – халцедоновидный кварц, Ca – кальцит, 1 – обрывок слоевища (?) эпифитоновых водорослей; d – шлиф 13: Ca – кальцит, 1 – фрагменты эпифитоновых водорослей (?)
 (фото Т. А. Корниловой, поляризационный микроскоп Olympus BX41)

Fig. 5. Microissues in the thin sections from the samples taken in the development zone of columnar stromatolites *Conophyton* (?) from the bioherm edifice of the Kamensky site of the Bozhekhansky megaswell:
a – thin section 2: Q – chalcedonic quartz, Ca – calcite, 1 – filamentous microfossil *Obruchevella aff. inviolate* in the stromatolite carbonate layer; b – thin section 7: Q – chalcedonic quartz, 1 – microfossil *Leiosphaeridia* sp.;
c – thin section 9: Q – chalcedonic quartz, Ca – calcite, 1 – blade fragment (?) of epiphytic algae; d – thin section 13: Ca – calcite, 1 – fragments of epiphytic algae (?)
 (photos by T. A. Kornilova, Olympus BX41 polarizing microscope)

постройки Каменского участка Божеханского мегавала. Морфология столбиков в основном определяется гидродинамикой среды. В шлифах отмечен халцедоновидный кварц, кальцит, установлены нитчатая микрофоссилия *Obruchevella aff. inviolate* [46] в карбонатном слойке строматолита, микрофоссилия *Leiosphaeridia* sp., обрывок слоевища (?) и фрагменты эпифитоновых водорослей (?).

Рис. 6 иллюстрирует фрагмент (пришлифовка) одного из образцов частично окремненного столбчатого строматолита, а также содержит фотографии с поляризационного микроскопа Olympus BX41. Образец отобран из обнажения Каменской постройки Божеханского мегавала. Решалась задача изучения

внутреннего строения особенностей микроструктуры строматолитовых слоев – фрагмента в шлифах.

Авторам настоящей статьи также представилась возможность изучить архивную коллекцию шлифов керна (рис. 7), отобранного из карбонатных толщ венда – кембрия и нижнего кембрия из Ахинских скважин в районе Божеханского мегавала и скважин северо-западнее, в области Верхнеленского поднятия: Христофоровской № 5 и Тутурской № 1. В керне нижнекембрийских карбонатов (привязка шлифов по полевому описанию образцов керна на скважине) из скважины Ахинской № 1 отмечены микрофитолитовые (*Osagia* и *Glebosites*) доломиты с реликтами сферо-

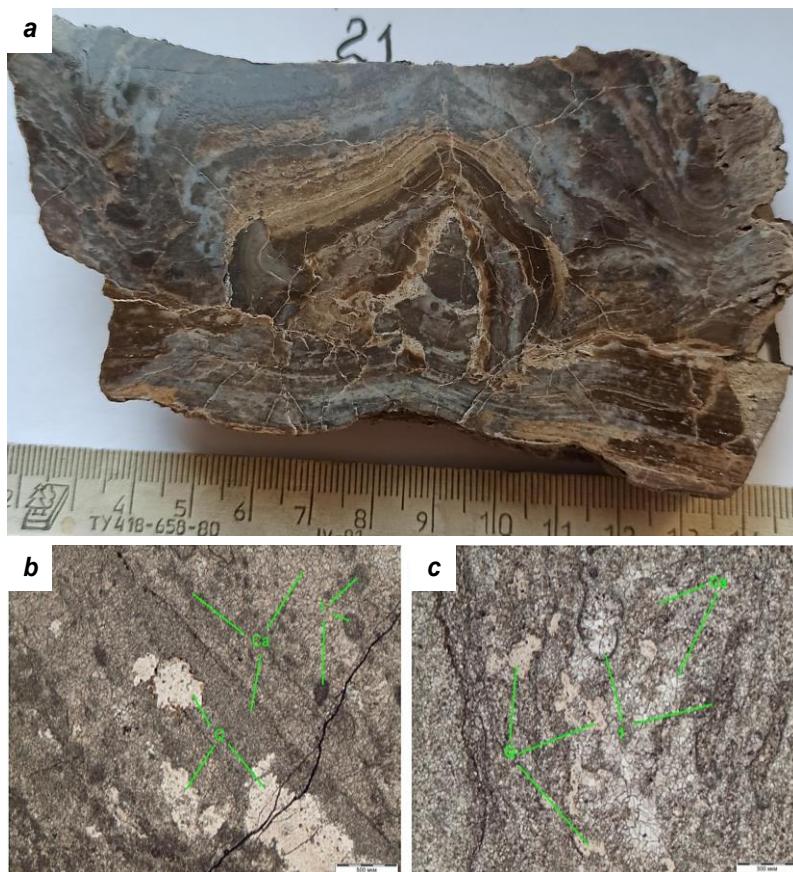


Рис. 6. Образец (полевой № 21) окремнелого столбчатого строматолита и внутреннее строение фрагмента, особенности микроструктуры слоев:

a – пришлифовка распиленного образца; **b, c –** микроструктура строматолита из образца 21 в шлифах:
Q – халцедоновидный кварц, Ca – кальцит, 1 – комковатая микроструктура (строматолитовых слоев)

(фото Т. А. Корниловой, поляризационный микроскоп Olympus BX41)

**Fig. 6. A sample (field no. 21) of silicified columnar stromatolite
and the internal structure of the fragment, features of layer microstructure:**

a – polished thin section of the saw cut sample; **b, c –** microstructure of the stromatolite from the sample 21
in thin sections: Q – chalcedonic quartz, Ca – calcite, 1 – lumpy microstructure (stromatolite layers)

(photos by T. A. Kornilova, Olympus BX41 polarizing microscope)

морфных (*Leiosphaeridia*) и нитчатых (*Oscillatoriopsis*) микрофоссилий, озагиевые органогенные структуры (остатки) (см. рис. 7) глеобситес⁹.

Обсуждение полученных результатов

По И. А. Китаевой¹⁰, отложения осинского горизонта Непско-Ботубинской антеклизы

представлены преимущественно доломитовыми породами, а в их основании – различными цианобактериальными биоценозами. В таких доломитах в центральных районах Сибирской платформы в осинском горизонте усольской свиты ранее были выявлены акритархи, микрофитолиты, водоросли, археоциаты и неопределенные обломки трилобитов¹¹. Из этих органических остатков наибольшее

⁹ Шашин С. Г., Комарова Н. И., Неустроев В. Л. Методические рекомендации по комплексной оценке карбонатных коллекторов при подсчете запасов нефти и газа в залежах Восточной Сибири. Иркутск: Изд-во ВостСибНИИГиМС, 1991. 112 с.

¹⁰ Китаева И. А. Типы и генезис фильтрационно-емкостного пространства пород-коллекторов нижнекембрийских карбонатных отложений юго-западного склона Непско-Ботубинской антеклизы: дисс. ... канд. геол.-минерал. наук: 25.00.06. М., 2020. 179 с.

¹¹ Шашин С. Г., Комарова Н. И., Неустроев В. Л. Методические рекомендации по комплексной оценке карбонатных коллекторов при подсчете запасов нефти и газа в залежах Восточной Сибири. Иркутск: Изд-во ВостСибНИИГиМС, 1991. 112 с.

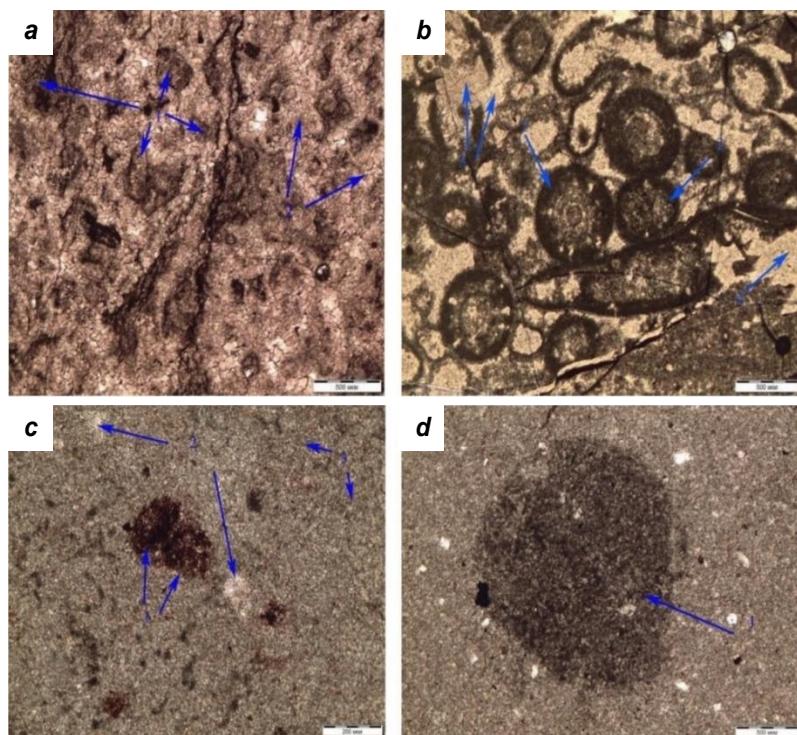


Рис. 7. Фитолиты в шлифах из керна глубоких скважин на северо-западе от Божеханского вала:
a – скважина Ахинская 1Р, глубина 2548,5 м: 1 – катаграфии, межформенный среднезернистый доломит;
b – скважина Христофоровская 5, глубина 912 м: 1 – Osagia aff recta, 2 – Osagia aff tenuilamellata, 3 – ангидрит,
4 – мелкозернистый доломит; с – скважина Ахинская 1Р, глубина 1663,8 м: 1 – Leiosphaeridia atava,
2 – ангидрит, 3 – мелкозернистый доломит; д – скважина Ахинская 1Р, глубина 1665,8 м:
1 – Lakhandinia af prolata (фото Т. А. Корниловой, поляризационный микроскоп Olympus BX41)

Fig. 7. Phytoliths in thin sections from the core of deep wells in the northwest of the Bozhekhansky swell:
a – Akhinskaya 1R well, the depth of 2548.5 m: 1 – catographies, interform medium-grained dolomite;
b – Khristoforovskaya 5 well, the depth of 912 m: 1 – Osagia aff recta, 2 – Osagia aff tenuilamellata, 3 – anhydrite,
4 – fine-grained dolomite; c – Akhinskaya 1R well, the depth of 1663.8 m: 1 – Leiosphaeridia atava,
2 – anhydrite, 3 – fine-grained dolomite; d – Akhinskaya 1R well, the depth of 1665.8 m:
1 – Lakhandinia af prolata (photos by T. A. Kornilova, Olympus BX41 polarizing microscope)

количество принадлежит синезеленым водорослям *Renalcis*. Много реликтовых представителей красных *Erythrophyton*. Отмечены водоросли родов *Chabakovia*, *Kordehyton*, *Koriloiphyton*, трубчатые *Proaulopora*. Из микрофитолитов доминируют сетчатые группы *Marco-vella*, густковые группы *Nubercularites*, менее распространены образования из группы *Hieroglyphites* [43]. Кроме того, отмечены *Glebosites* и *Osagia*.

Вероятно, что большое количество известны выделяющих синезеленых водорослей и цианобактерий, таких как *Oscillatoriopsis* и др. [44], являлись «строительями» микрофитолитов, в том числе *Glebosites* и *Osagia*. Рассматриваемые органогенные доломиты похожи на реликтово-органогенные доломиты осинского горизонта Даниловской площади Непско-Ботуобинской антеклизы. Сходство литологического и биологического составов этих пород

предполагает, что скважинами Ахинской группы, Тутурскими и Христофоровскими вскрыты изолированные участки обособленных биогермных зон в карбонатных постройках нижнего кембрия, аналогичные рифогенным структурам Непского свода.

Заключение

Органические биогермные постройки на Божеханском поднятии и сопредельных антиклинальных структурах в осадочном чехле следует считать геологическим аргументом сингенетичности ряда положительных структур Верхнеленского поднятия. Не исключено, что брахиформная складчатость, выявленная и описанная в 60-х годах XX века [24, 26 и др.], отражает в том числе локальные сингенетичные, то есть приподнятые в кембрии участки, которые позже многоэтапно деформировались в общем поле напряжений Байкало-Па-



томской складчатой области¹² [20, 21]. Тогда карбонатные постройки формировались над локальными поднятиями фундамента (Атовско-Шамановская), на гребнях сингенетичных складчатых форм (Божеханская, Христофоровская, Коркинско-Тутурская и другие). Жигаловский и Божеханский мегавалы – с верхнего (карбонатного) венда. В кембрии Божеханский мегавал играл роль большого барьерного рифа, разделявшего бассейны разной солености [5, 19–21]. Северо-западнее формировался замкнутый бассейн, в котором циклически шло отложение карбонатов и солей. В итоге в классическом осадочном процессе [3] в завершающих ангарском и литвинцевском циклах развития солеродного бассейна [33] в чарском – зеледеевском веках нижнего кембрия сформировались карбонатные платформы – Покровская, Атовско-Шамановская, (Коркинско-Тутурская), Христофоровская, Верхне-Хандинская, Шонская и другие.

Позднее, в силуре – девоне активизация шарьяжно-надвигового процесса привела к формированию в поле Ангаро-Ленского палеопрогиба линейной складчатости аллохтонного типа, относимой к Манзурскому сектору Байкало-Патомского складчато-надвигового пояса¹³ [47]. Природная неоднородность аллохтона в части увеличенного по толщине пакета карбонатных пластов на участках органогенных построек, несомненно, отразилась на последующей эволюции кембрийских толщ, а также на степени трещиноватости карбонатных пластов.

Итогом мезозойско-кайнозойской активизации юга Сибирской платформы стало формирование Верхнеленского сводового поднятия – крупнейшей положительной структуры в юго-восточной части Ангаро-Ленской ступени в зоне сочленения одноименной нефтегазоносной области и Предбайкало-Предпатомского краевого прогиба [15–18, 23]. Широкое развитие кембрийских карбонатных платформ, обрамляющих Илгинскую палеовпа-

дину, обусловило развитие вторичных карбонатных коллекторов. Перспективы нефтегазоносности объектов карбонатного мегарезервуара нижнего кембрия Верхнеленского поднятия подтверждены промышленными притоками углеводородов на Атовской, Бильчирской, Христофоровской, Балыхтинской, Осинской, Радуйской, Тутурской, Рудовской, Ко-выктинской площадях.

Важно отметить, что и сегодня, на новом уровне технологий геологической разведки природных резервуаров углеводородов, остаются допуски и эффекты масштабирования при переходе от точечных данных керна к интерпретации геологического строения межскважинного пространства. На основе исследования нижнекембрийских толщ и биогермных построек Божеханского поднятия, а также анализа опубликованных работ можно утверждать, что биогермы развивались по единому циклу [33]. Они аналогичны осинским, близки по архитектуре и зональности. В связи с этим их изучение в обнажениях позволяет нам провести аналогии и глубже понять геологию тех погребенных рифогенных объектов на севере региона в пределах Непско-Ботуобинской антиклизы, поиски и разведка которых сегодня реализуются только на основе 3D сейсморазведочных работ, электроразведки и глубокого бурения¹⁴ [9, 11, 48, 49]. В то же время тщательное и многостороннее исследование керна скважин дает возможность сопоставить литофациальные особенности формирования отдельных участков Божехана как долгоживущей барьерной рифовой гряды, протяженной линейной структуры юго-восточного фаса Верхнеленского поднятия. Это крайне важно для обоснования детальной геолого-генетической модели формирования таких объектов в нижнем кембрии Ангаро-Ленской нефтегазоносной области, закономерностей их локализации, ведь сегодня нефтегазоносность погребенных органогенных рифовых построек в пределах отдельных площадей и месторож-

¹²Мазукабзов А. М. Структура и геодинамика южной окраины Сибирского кратона: дисс. ... д-ра геол.-минерал. наук: 25.00.03. Иркутск, 2003. 403 с.

¹³Там же.

¹⁴Китаева И. А. Типы и генезис фильтрационно-емкостного пространства пород-коллекторов нижнекембрийских карбонатных отложений юго-западного склона Непско-Ботуобинской антиклизы: дисс. ... канд. геол.-минерал. наук: 25.00.06. М., 2020. 179 с.



дений Лено-Тунгусской нефтегазоносной провинции доказана, ряд углеводородных месторождений Непско-Ботубинской антеклизы в органогенных постройках поставлен на ба-

ланс, здесь активно идет подготовка к вводу в эксплуатацию, а часть объектов уже разрабатывается.

Список источников

1. Обручев В. А. Геология Сибири: монография. В 3 т. М. – Л.: Изд-во АН СССР, 1935–1938. 1357 с.
2. Мельников Н. В. Венд-кембрийский соленосный бассейн Сибирской платформы: стратиграфия, история развития. Новосибирск: Изд-во СНИИГГИМС, 2018. 177 с.
3. Варламов А. И., Ефимов А. С., Конторович А. Э., Конторович В. А., Коровников И. В., Пегель Т. В. [и др.]. Стратиграфия нефтегазоносных бассейнов Сибири. Кембрий Сибирской платформы. В 2 т. Т. 1. Стратиграфия / ред. Ю. Я. Шабанов. Новосибирск: Изд-во ИНГГ СО РАН, 2016. 497 с.
4. Дольник Т. А. Строматолиты и микрофитолиты в стратиграфии рифея и венда складчатого обрамления Сибирской платформы. Новосибирск: Гео, 2000. 317 с.
5. Жарков М. А., Чечель Э. И. Осадочные формации кембрия Ангаро-Ленского прогиба. В 3 ч. Ч. 1. Общая характеристика кембрийских отложений и карбонатная формация Ангаро-Ленского прогиба. Новосибирск: Наука, 1973. 238 с.
6. Королюк И. К. Сравнительная характеристика формаций рифея и кембрия Прибайкалья. М: Изд-во АН СССР, 1962. 129 с.
7. Станевич А. М., Корнилова Т. А., Мазукабзов А. М., Вахромеев А. Г. Корреляция и микрофоссилии венд-кембрийских отложений, вскрытых Чайкинской параметрической скважиной 279 // Известия Иркутского государственного университета. Серия «Науки о Земле». 2015. Т. 12. С. 124–135.
8. Миурский А. В., Старосельцев В. С., Мельников Н. В., Рябкова Л. В., Соболев П. Н., Сурнин А. И. [и др.]. Опыт изучения Чайкинского поднятия – крупного объекта нефтепоисковых работ на Сибирской платформе // Геология и минерально-сырьевые ресурсы Сибири. 2010. № 4, С. 14–25.
9. Гайдук А. В., Альмендингер О. А. Условия формирования и критерии прогноза зон улучшенных коллекторских свойств древних венд-кембрийских резервуаров (на примере Даниловского лицензионного участка (Восточная Сибирь)) // Научно-технический вестник ОАО «НК “Роснефть”». 2013. № 1. С. 10–13.
10. Конторович А. Э., Варламов А. И., Ефимов А. С., Конторович В. А., Коровников И. В., Кринин В. А. [и др.]. Стратиграфическая схема кембрийских отложений юга Предъенисейской части Западной Сибири // Геология и геофизика. 2021. Т. 62. № 3. С. 443–465. <https://doi.org/10.15372/GiG2020206>.
11. Кравченко А. А., Пашевин А. М., Лаврентьева А. Е. Перспективы нефтегазоносности рифовых отложений на юге Вилюйской синеклизы по геофизическим данным // Науки о Земле и недропользование. 2020. Т. 43. № 2. С. 209–219. <https://doi.org/10.21285/2686-9993-2020-43-2-209-219>.
12. Максимова Е. Н., Чертина К. Н. Циклическое строение осинского горизонта на примере одного из месторождений Непско-Ботубинской антеклизы // Литология осадочных комплексов Евразии и шельфовых областей: материалы IX Всерос. литологич. совещ. (с междунар. уч.). Казань, 2019. С. 271–272.
13. Сухов С. С. О роли фациально-седиментологических критериев в реконструкции кембрийских палеобассейнов востока Сибирской платформы // Современные проблемы седиментологии в нефтегазовом инжиниринге: труды III Всерос. науч.-практ. седиментологич. совещ. (г. Томск, 10–12 апреля 2017 г.). Томск: Изд-во ЦППС НД, 2017. С. 209–214.
14. Сухов С. С., Фомин А. М., Моисеев С. А. Палеогеография как инструмент реконструкции кембрийского рифообразования на востоке Северо-Тунгусской нефтегазоносной области: от истории исследований к перспективам // Нефтегазовая геология. Теория и практика. 2018. Т. 13. № 3. https://doi.org/10.17353/2070-5379/28_2018.
15. Вахромеев А. Г., Смирнов А. С., Мазукабзов А. М., Горлов И. В., Мисюркеева Н. В., Шутов Г. Я. [и др.]. Верхнеленское сводовое поднятие – главный объект подготовки ресурсной базы углеводородного сырья на юге Сибирской платформы // Геология и минерально-сырьевые ресурсы Сибири. 2019. № 3. С. 38–56. <https://doi.org/10.20403/2078-0575-2019-3-38-56>.
16. Шутов Г. Я. Верхнеленское сводовое поднятие – новый перспективный объект для поисков залежей газа в Ангаро-Ленской НГО // Геология нефти и газа. 1987. № 1. С. 5–9.
17. Вахромеев А. Г., Сверкунов С. А., Иванишин В. М., Смирнов А. С., Горлов И. В. Биогермные постройки с каверново-связанным пустотным пространством и аномально высоким пластовым давлением флюидных систем в карбонатных природных резервуарах венда – кембрия на юге Сибирской платформы // Строение литосферы и геодинамика: материалы XXVII Всерос. молодежн. конф. (г. Иркутск, 22–28 мая 2017 г.). Иркутск: Изд-во ИЗК СО РАН, 2017. С. 54–56.
18. Смирнов А. С., Вахромеев А. Г., Курчиков А. Р., Горлов И. В., Кокарев П. Н., Касьянов В. В. [и др.]. Выявление и картирование флюидонасыщенных анизотропных каверново-трещинных коллекторов Ковыктинского газоконденсатного месторождения // Геология, геофизика и разработка нефтяных и газовых месторождений. 2019. № 5. С. 4–12. [https://doi.org/10.30713/2413-5011-2019-5\(329\)-4-12](https://doi.org/10.30713/2413-5011-2019-5(329)-4-12).
19. Королюк И. К. Особенности строения валов южной части Прибайкалья на примере Божеханского поднятия // Тектоника нефтегазоносных областей Сибири: сб. ст. М.: Наука, 1967. С. 60–70.



20. Замараев С. М. Краевые структуры южной части Сибирской платформы. М.: Наука, 1967. 248 с.
21. Замараев С. М., Адаменко О. М., Рязанов Г. В., Кульчitsкий А. А., Адаменко Р. С., Викентьева Н. М. Структура и история развития Предбайкальского предгорного прогиба. М.: Наука, 1976. 134 с.
22. Васильев В. Г., Иванова М. Н., Мордовский В. Т. О сочленении Восточно-Сибирской и Западно-Сибирской платформ в связи с оценкой перспектив нефтегазоносности // Вопросы нефтегазоносности Сибири: сб. ст. М.: Гостоптехиздат, 1959. С. 69–75.
23. Жарков М. А., Замараев С. М. История тектонического развития юга Сибирской платформы // Вопросы сравнительной тектоники древних платформ: материалы совещ. по проблемам тектоники (г. Москва, 1–7 февраля 1963 г.). М.: Наука, 1964. С. 135–145.
24. Мазур В. Б. Строение восточной части Иркутского амфитеатра и особенности тектоники отложений ленского яруса // Геология и нефтегазоносность юга Восточной Сибири: сб. ст. М.: Недра, 1969. С. 148–154.
25. Труфанова Н. В., Кривощеков А. Л., Наумова Ю. А. Методика и результаты кинематической интерпретации по региональному профилю «Ковыктинское месторождение – Предпатомский прогиб» // Технологии сейсморазведки. 2007. № 3. С. 83–91.
26. Карасев И. П. Литолого-стратиграфическая и geoхимическая характеристика пород южной части Сибирской платформы // Геология и нефтегазоносность Восточной Сибири. М.: Гостоптехиздат, 1959. С. 8–186.
27. Кононов А. И. Новые данные по тектонике юго-восточной части Сибирской платформы // Геология и нефтегазоносность Восточной Сибири. М.: Гостоптехиздат, 1959. С. 356–434.
28. Одинцов М. М., Павловский Е. В. История геологического изучения // Геология СССР. Т. XVII. Иркутская область. Ч. 1. Геологическое описание. М.: Недра, 1962. С. 9–15.
29. Притула Ю. А., Ефремов М. И., Базанов Э. А., Мандельбаум М. М., Савинский К. А., Карасев И. П. [и др.]. Результаты геологоразведочных работ на нефть и газ в Иркутской области и план региональных работ на 1965–1970 гг. // Геология и нефтегазоносность юга Сибирской платформы: сб. ст. Вып. 247. Л.: Гостоптехиздат, 1966. С. 151–159.
30. Адамов Е. А., Цобин В. А., Чечель Э. И. Некоторые черты геологического строения и развития Илгинской впадины в связи с перспективами калиеносности // Труды Института геологии и геофизики. Вып. 116. Новосибирск: Гео, 1970. С. 100–110.
31. Королюк И. К. Некоторые строматолиты кембрия Иркутского амфитеатра // Труды Института нефти. Вып. 7. Алма-Ата: Изд-во АН Казахской ССР, 1956. С. 51–59.
32. Королюк И. К. Сравнительная характеристика формаций рифея и кембрия Прибайкалья. М.: Изд-во АН СССР, 1962. 129 с.
33. Британ И. В., Жарков М. А., Кавицкий М. Л., Колосов А. С., Машович Я. Г., Чечель Э. И. Строение и условия формирования кембрийских соленосных отложений на территории СССР // Проблемы соленакопления: сб. ст. Т. 2. Новосибирск: Наука, 1977. С. 203–227.
34. Чечель Э. И., Машович Я. Г., Гилев Ю. Г. Закономерности строения соленосных отложений кембрия юга Сибирской платформы. М.: Недра, 1977. 144 с.
35. Калинкина Л. И., Шутов Г. Я. Рифогенные отложения среднемотской подсвиты Непского свода юга Сибирской платформы // Советская геология. 1981. № 1. С. 68–72.
36. Мышевский Н. В. Игнялинский барьерный риф – новый перспективный объект на Непском своде // Геология и геофизика. 1991. Т. 32. № 11. С. 99–107.
37. Багринцева К. И. Условия формирования и свойства карбонатных коллекторов нефти и газа. М.: Изд-во РГГУ, 1999. 285 с.
38. Дольник Т. А., Воронцова Г. А. Биостратиграфия верхнего докембрия и нижних горизонтов кембрия Северо-Байкальского и Патомского нагорий (на основе изучения строматолитов и микрофитолитов). Иркутск: Вост.-Сиб. кн. изд-во, 1974. 95 с.
39. Журавлева И. Т. Раннекембрейские орогенные постройки на территории Сибирской платформы // Организм и среда в геологическом прошлом: сб. ст. М.: Наука, 1966. С. 61–84.
40. Маслов В. П. О природе строматолита *Cenophyton* // Проблемы палеонтологии. Т. 4. М.: Изд-во Палеонтологической лаборатории МГУ СССР, 1938. С. 325–332.
41. Маслов В. П. Принципы номенклатуры и систематики строматолитов // Известия Академии наук СССР. Серия геологическая. 1953. № 4. С. 105–112.
42. Маслов В. П. Строматолиты и фации // Доклады Академии наук СССР. 1959. Т. 125. № 5. С. 1085–1088.
43. Лучинина В. А. Палеоальгология при переходе от циано-бактериальной (stromatolitовой) к водорослевой экосистеме на примере кембрийских отложений Сибирской платформы // Рифогенные формации и рифы в эволюции биосферы. М.: Изд-во ПИН РАН, 2011. С. 26–37.
44. Станевич А. М., Немеров В. К., Чатта Е. Н. Микрофоссилии протерозоя Саяно-Байкальской складчатой области: обстановки обитания, природа и классификация. Новосибирск: Гео, 2006. 200 с.
45. Терлеев А. А., Лучинина В. А., Сосновская О. В., Багмет Г. Н. Известковые водоросли и нижняя граница кембрия в западной части Алтае-Саянской складчатой области // Геология и геофизика. 2004. Т. 45. № 4. С. 485–491.
46. Колосов П. Н. Позднедокембрейские микроорганизмы востока Сибирской платформы. Якутск: Изд-во ЯФ СО АН СССР, 1984. 84 с.
47. Сметанин А. В. Опыт динамической интерпретации гравитационных аномалий. Иркутск, 2000. 85 с.
48. Губина Е. А., Тихонова К. А., Винокурова О. А., Лукьянов В. В., Волков В. Г., Неустроев К. А. [и др.]. Модель осинского продуктивного горизонта (пласт Б1) на месторождениях Иркутской области // Нефтяное хозяйство. 2022. № 2. С. 46–51. <https://doi.org/10.24887/0028-2448-2022-2-46-51>.
49. Вахромеев А. Г., Корнилова Т. А., Мисюркеева Н. В., Степанова Н. И., Шемин Г. Г., Уренко Р. А. [и др.].



Божеханское поднятие Предбайкальского прогиба – краевая барьерно-рифовая система кембрийского соленосного бассейна юга Сибирской платформы // Геодинамическая эволюция литосферы Центрально-Ази-

атского подвижного пояса (от океана к континенту): материалы науч. совещ. (г. Иркутск, 19–22 октября 2021 г.). Иркутск: Изд-во ИЗК СО РАН, 2021. Вып. 19. С. 24–26.

References

1. Obruchev V. A. *Geology of Siberia: monograph*. In 3 vol. Moscow – Leningrad: Academy of Sciences of the USSR; 1935–1938. 1357 p. (In Russ.).
2. Mel'nikov N. V. *Vendian-Cambrian saline basin of the Siberian platform: stratigraphy and development history*. Novosibirsk: Siberian Research Institute of Geology, Geophysics and Mineral Resources; 2018. 177 p. (In Russ.).
3. Varlamov A. I., Efimov A. S., Kontorovich A. E., Kontorovich V. A., Korovnikov I. V., Pegel' T. V., et al. *Stratigraphy of oil and gaz basins of Siberia. Cambrian of Siberian platform*. Vol. 1. *Stratigraphy*. Novosibirsk: Trofimuk Institute of Petroleum Geology and Geophysics of the Siberian Branch of the Russian Academy of Sciences; 2016. 497 p. (In Russ.).
4. Dol'nik T. A. *Stromatolites and microphytoliths in the stratigraphy of the Riphean and Vendian folded framing of the Siberian Platform*. Novosibirsk: Geo; 2000. 317 p. (In Russ.).
5. Zharkov M. A., Chechel' E. I. *Cambrian sedimentary formations of the Angara-Lena depression*. In 3 parts. Part 1. *General characteristics of the Cambrian deposits and the carbonate formation of the Angara-Lena depression*. Novosibirsk: Nauka; 1973. 238 p. (In Russ.).
6. Korolyuk I. K. *Comparative characteristics of the Riphean and Cambrian formations of the Baikal region*. Moscow: Academy of Sciences of the USSR; 1962. 129 p. (In Russ.).
7. Stanevich A. M., Kornilova T. A., Mazukabzov A. M., Vahromeev A. G. Correlation and microfossils of Vend-Cambrian sediments from Chaika parametrical borehole 279. *Izvestiya irkutskogo gosudarstvennogo universiteta. Seriya "Nauki o Zemle"* = Bulletin of Irkutsk State University. Series "Earth Sciences". 2015;12:124–135. (In Russ.).
8. Migursky A. V., Staroseltsev V. S., Melnikov N. V., Ryabkova L. V., Sobolev P. N., Surnin A. I., et al. Experience of the Chaikinskoye uplift study – the major object of petroleum exploration on the Siberian platform. *Geologiya i mineral'no-syr'evye resursy Sibiri* = Geology and Mineral Resources of Siberia. 2010;4:14–25. (In Russ.).
9. Gaiduk A. V., Almendinger O. A. Formation conditions and criteria for prediction of areas of improved reservoir properties ancient Vendian-Cambrian reservoirs (for example, Danilovskiy license area (East Siberia)). *Nauchno-tehnicheskii vestnik OAO "NK 'Rosneft'"*. 2013; 1:10–13. (In Russ.).
10. Kontorovich A. E., Varlamov A. I., Efimov A. S., Kontorovich V. A., Korovnikov I. V., Krinin V. A., et al. Stratigraphic scheme of Cambrian deposits, south of the cis-Yenisei area of West Siberia. *Geologiya i geofizika*. 2021;62(3):443–465. <https://doi.org/10.15372/GiG2020206>.
11. Kravchenko A. A., Pasheviv A. M., Lavrenteva A. E. Oil-and-gas potential of the reef deposits in the Vilyuy syneclide south. *Nauki o Zemle i nedropol'zovanie* = Earth sciences and subsoil use. 2020;43(2):209–219. (In Russ.). <https://doi.org/10.21285/2686-9993-2020-43-2-209-219>.
12. Maksimova E. N., Chertina K. N. Cyclic structure of the Osinsky horizon on the example of a deposit of the Nepa-Botuoba anteclide. In: *Litologiya osadochnykh kompleksov Evrazii i shel'fovyykh oblastei: materialy IX Vseros. litologich. soveshch. (s mezhdunar. uch.)* = Lithology of sedimentary complexes of Eurasia and shelf regions: materials of the 9th All-Russian lithological meeting (with international participation). Kazan; 2019, p. 271–272. (In Russ.).
13. Sukhov S. S. On the role of facies-sedimentological criteria in reconstruction of Cambrian paleobasins in the east of the Siberian Platform. In: *Sovremennye problemy sedimentologii v neftegazovom inzhiniringe: trudy III Vseros. nauch.-prakt. sedimentologich. soveshch.* = Modern problems of sedimentology in oil and gas engineering: proceedings of the 3rd All-Russian scientific and practical sedimentological meeting. 10–12 April 2017, Tomsk. Tomsk: Center for Training and Retraining of Oil and Gas Specialists; 2017, p. 209–214. (In Russ.).
14. Sukhov S. S., Fomin A. M., Moiseev S. A. Paleogeography as investigation tool of Cambrian reefs in the eastern part of the North-Tunguska petroleum area. *Neftegazovaya geologiya. Teoriya i praktika*. 2018;13(3). (In Russ.). https://doi.org/10.17353/2070-5379/28_2018.
15. Vakhromeev A. G., Smirnov A. S., Mazukabzov A. M., Gorlov I. V., Misurkeeva N. V., Shutov G. Ya., et al. The upper Lena arched uplift is the main object of preparing a resource base of hydrocarbons in the south of the Siberian platform. *Geologiya i mineral'no-syr'evye resursy Sibiri* = Geology and Mineral Resources of Siberia. 2019;3:38–56. (In Russ.). <https://doi.org/10.20403/2078-0575-2019-3-38-56>.
16. Shutov G. Ya. The Upper Lena arched uplift as a new promising object for gas prospecting in the Angara-Lena oil and gas-bearing area. *Geologiya nefti i gaza*. 1987;1:5–9. (In Russ.).
17. Vakhromeev A. G., Sverkunov S. A., Ivanishin V. M., Smirnov A. S., Gorlov I. V. Bioherm structures with cavern-connected pore space and abnormally high formation pressure of fluid systems in Vendian-Cambrian natural carbonate reservoirs in the south of the Siberian Platform. In: *Stroenie litosfery i geodinamika: materialy XXVII Vseros. molodezhn. konf.* = Lithospheric structure and geodynamics: materials of the 27th All-Russian youth conference. 22–28 May 2017, Irkutsk. Irkutsk: Institute of the Earth's Crust, Siberian Branch of the Russian Academy of Sciences; 2017, p. 54–56. (In Russ.).
18. Smirnov A. S., Vakhromeev A. G., Kurchikov A. R., Gorlov I. V., Kokarev P. N., Kasyanov V. V., et al. Identification and mapping of fluid-saturated anisotropic cavern-



- cracked collectors of the Kovyktinsky gas-condensate deposit. *Geologiya, geofizika i razrabotka neftyanykh i gazovykh mestorozhdenii = Geology, geophysics and development of oil and gas fields.* 2019;5:4-12. (In Russ.). [https://doi.org/10.30713/2413-5011-2019-5\(329\)-4-12](https://doi.org/10.30713/2413-5011-2019-5(329)-4-12).
19. Korolyuk I. K. Structural features of swells in the southern part of the Baikal region on the example of the Bozhekhan uplift. In: *Tektonika neftegazonosnykh oblastei Sibiri = Tectonics of the oil and gas regions of Siberia.* Moscow: Nauka; 1967, p. 60–70. (In Russ.).
20. Zamaraev S. M. *Marginal structures of the southern part of the Siberian platform.* Moscow: Nauka; 1967. 248 p. (In Russ.).
21. Zamaraev S. M., Adamenko O. M., Ryazanov G. V., Kul'chitskii A. A., Adamenko R. S., Vikent'eva N. M. *Structure and development history of the Cis-Baikal piedmont depression.* Moscow: Nauka; 1976. 134 p. (In Russ.).
22. Vasil'ev V. G., Ivanova M. N., Mordovskii V. T. On the inter-area of the East Siberian and West Siberian platforms in terms of oil and gas potential assessment. In: *Voprosy neftegazonosnosti Sibiri = Issues of oil and gas potential in Siberia.* Moscow: Gostoptekhizdat; 1959, p. 69–75. (In Russ.).
23. Zharkov M. A., Zamaraev S. M. The history of tectonic development of the south of the Siberian platform. In: *Voprosy srovniatel'noi tektoniki drevnikh platform: materialy soveshch. po problemam tektoniki = Issues of comparative tectonics of ancient platforms: proceedings of the conference on tectonic problems.* 1–7 February 1963, Moscow. Moscow: Nauka; 1964, p. 135–145. (In Russ.).
24. Mazur V. B. Structure of the eastern part of the Irkutsk amphitheater and tectonic features of the deposits of the Lena stage. In: *Geologiya i neftegazonosnost' yuga Vostochnoi Sibiri = Geology and oil and gas potential of the south of Eastern Siberia.* Moscow: Nedra; 1969, p. 148–154. (In Russ.).
25. Trufanova N. V., Krivoshchekov A. L., Naumova Yu. A. Methodology and results of kinematic interpretation for the regional profile "Kovykta field – Predpatomsky trough". *Tekhnologii seismorazvedki.* 2007;3:83–91. (In Russ.).
26. Karasev I. P. Lithological-stratigraphic and geochemical characteristics of the rocks in the south of the Siberian platform. In: *Geologiya i neftegazonosnost' Vostochnoi Sibiri = Geology and oil and gas potential of Eastern Siberia.* Moscow: Gostoptekhizdat; 1959, p. 8–186. (In Russ.).
27. Kononov A. I. New data on the tectonics of the southeastern part of the Siberian Platform. *Geologiya i neftegazonosnost' Vostochnoi Sibiri = Geology and oil and gas potential of Eastern Siberia.* Moscow: Gostoptekhizdat; 1959, p. 356–434. (In Russ.).
28. Odintsov M. M., Pavlovskii E. V. History of geological study. In: *Geologiya SSSR. T. XVII. Irkutskaya oblast'. Ch. 1. Geologicheskoe opisanie = USSR Geology. Vol. 17. Irkutsk region. Part 1. Geological description.* Moscow: Nedra; 1962, p. 9–15. (In Russ.).
29. Pritula Yu. A., Efremov M. I., Bazanov E. A., Mandelbaum M. M., Savinskii K. A., Karasev I. P., et al. Results of exploration works for oil and gas in the Irkutsk region and a plan of regional works for the period from 1965 to 1970. In: *Geologiya i neftegazonosnost' yuga Sibirskoi platform = Geology and oil and gas potential of the south of the Siberian platform.* Iss. 247. Leningrad: Gostoptekhizdat; 1966, p. 151–159. (In Russ.).
30. Adamov E. A., Tsobin V. A., Chechel' E. I. Some features of the geological structure and development of the Ilga depression in terms of potential potassium content. In: *Trudy Instituta geologii i geofiziki = Proceedings of the Institute of Geology and Geophysics.* Iss. 116. Novosibirsk: Geo; 1970, p. 100–110. (In Russ.).
31. Korolyuk I. K. Some Cambrian stromatolites of the Irkutsk amphitheater. In: *Trudy Instituta nefti = Proceedings of the Institute of Oil.* Iss. 7. Alma-Ata: Academy of Sciences of the Kazakh SSR; 1956, p. 51–59. (In Russ.).
32. Korolyuk I. K. *Comparative characteristics of the Riphean and Cambrian formations of the Baikal region.* Moscow: Academy of Sciences of the USSR; 1962. 129 p. (In Russ.).
33. Britan I. V., Zharkov M. A., Kavitskii M. L., Kolosov A. S., Mashovich Ya. G., Chechel' E. I. Structure and formation conditions of the Cambrian salt-bearing deposits on the territory of the USSR. In: *Problemy solenakopleniya = Problems of salt accumulation.* Vol. 2. Novosibirsk: Nauka; 1977, p. 203–227. (In Russ.).
34. Chechel' E. I., Mashovich Ya. G., Gilev Yu. G. *Structural regularities of Cambrian salt-bearing deposits in the south of the Siberian Platform.* Moscow: Nedra; 1977. 144 p. (In Russ.).
35. Kalinkina L. I., Shutov G. Ya. Reef deposits of the Middle Mot subformation of the Nepa arch in the south of the Siberian platform. *Sovetskaya geologiya.* 1981;1:68–72. (In Russ.).
36. Myshevskii N. V. The Ignyalinsky barrier reef as a new promising object on the Nepa arch. *Geologiya i geofizika.* 1991;32(11):99–107. (In Russ.).
37. Bagrintseva K. I. *Formation conditions and properties of oil and gas carbonate reservoirs.* Moscow: Russian State University for Geological Prospecting; 1999. 285 p. (In Russ.).
38. Dol'nik T. A., Vorontsova G. A. *Biostratigraphy of the upper Precambrian and lower Cambrian horizons of the North Baikal and Patom highlands (based on the study of stromatolites and microphytoliths).* Irkutsk: Vost.-Sib. kn. izd-vo; 1974. 95 p. (In Russ.).
39. Zhuravleva I. T. Early Cambrian orogenic structures on the territory of the Siberian Platform. In: *Organizm i sreda v geologicheskem proshlom = Organism and environment in the geological past.* Moscow: Nauka; 1966, p. 61–84. (In Russ.).
40. Maslov V. P. On the Conophyton stromatolite nature. *Problemy paleontologii = Problems of Paleontology.* Vol. 4. Moscow: Paleontological Laboratory of the Moscow State University of the USSR; 1938, p. 325–332. (In Russ.).
41. Maslov V. P. Principles of stromatolite nomenclature and classification. *Izvestiya Akademii nauk SSSR. Seriya geologicheskaya.* 1953;4:105–112. (In Russ.).
42. Maslov V. P. Stromatolites and facies. *Doklady Akademii nauk SSSR.* 1959;125(5):1085–1088. (In Russ.).
43. Luchinina V. A. Paleoalgology under transition



from cyanobacterial (stromatolitic) to algal ecosystem on the example of the Cambrian deposits of the Siberian Platform. In: *Rifogennye formatsii i rify v evolyutsii biosfery = Reef formations and reefs in biosphere evolution*. Moscow: Borissiak Paleontological Institute of the Russian Academy of Sciences; 2011, p. 26–37. (In Russ.).

44. Stanevich A. M., Nemerov V. K., Chatta E. N. *Proterozoic microfossils of the Sayan-Baikal folded area: habitats, nature and classification*. Novosibirsk: Geo; 2006. 200 p. (In Russ.).

45. Teplyev A. A., Luchinina V. A., Cocco Novokayeva O. V., Bagmet G. N. Calcareous algae and the lower boundary of Cambrian in the western part of the Altai-Sayan folded region. *Geologiya i geofizika*. 2004;45(4):485-491. (In Russ.).

46. Kolosov P. N. *Late Precambrian microorganisms of the east of the Siberian platform*. Yakutsk: Yakut Branch of the Siberian Branch of the USSR Academy of Sciences; 1984. 84 p. (In Russ.).

47. Smetanin A. V. *Experience of dynamic interpreta-*

tion of gravitational anomalies. Irkutsk; 2000. 85 p. (In Russ.).

48. Gubina E. A., Tikhonova K. A., Vinokurova O. A., Lukyanov V. V., Volkov V. G., Neustroev K. A., et al. Model of the Osinsky productive horizon (formation B₁) in the fields of the Irkutsk region. *Neftyanoe khozyaistvo*. 2022;2:46-51. (In Russ.). <https://doi.org/10.24887/0028-2448-2022-2-46-51>.

49. Vakhromeev A. G. Kornilova T. A., Misurkeeva N. V., Stepanova N. I., Shemin G. G., Urenko R. A., et al. The Bozhekhian uplift of the Cis-Baikal depression as a marginal barrier-reef system of the Cambrian salt-bearing basin in the south of the Siberian Platform. In: *Geodinamicheskaya evolyutsiya litosfery Tsentral'no-Aziatskogo podvzhnogo poyasa (ot okeana k kontinentu): materialy nauch. soveshch.* = Geodynamic evolution of the Central Asian mobile belt lithosphere (from ocean to continent): materials of the scientific meeting. 19–22 October 2021, Irkutsk. Irkutsk: Institute of the Earth's Crust, Siberian Branch of the Russian Academy of Sciences; 2021, iss. 19, p. 24–26. (In Russ.).

Информация об авторах / Information about the authors



Вахромеев Андрей Гелиевич,
доктор геолого-минералогических наук,
ведущий научный сотрудник,
заведующий Лабораторией геологии нефти и газа,
Институт земной коры СО РАН,
г. Иркутск, Россия,
доцент кафедры нефтегазового дела,
Институт недропользования,
Иркутский национальный исследовательский технический университет,
г. Иркутск, Россия,
andrey_igp@mail.ru,
<https://orcid.org/0000-0002-0712-6568>.

Andrey G. Vakhromeev,
Dr. Sci. (Geol. & Mineral.),
Leading Researcher,
Head of the Oil and Gas Laboratory,
Institute of the Earth's Crust, Siberian Branch of the Russian Academy of Sciences,
Irkutsk, Russia,
Associate Professor of the Department of Oil and Gas Business,
Institute of Subsoil Use,
Irkutsk National Research Technical University,
Irkutsk, Russia,
andrey_igp@mail.ru,
<https://orcid.org/0000-0002-0712-6568>.



Корнилова Татьяна Александровна,
ведущий инженер Лаборатории геологии нефти и газа,
Институт земной коры СО РАН,
г. Иркутск, Россия,
kornilova@crust.irk.ru.
Tatiana A. Kornilova,
Leading Engineer of the Oil and Gas Laboratory,
Institute of the Earth's Crust, Siberian Branch of the Russian Academy of Sciences,
Irkutsk, Russia,
kornilova@crust.irk.ru.



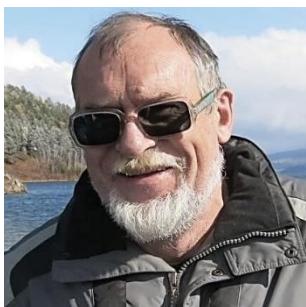
Мисюркеева Наталья Викторовна,
аспирант,
ведущий инженер Лаборатории геологии нефти и газа,
Институт земной коры СО РАН,
г. Иркутск, Россия,
mnv@crust.irk.ru.

Natalia V. Misurkeeva,
Postgraduate Student,
Leading Engineer of the Oil and Gas Laboratory,
Institute of the Earth's Crust, Siberian Branch of the Russian Academy of Sciences,
Irkutsk, Russia,
mnv@crust.irk.ru.



Уренко Роман Сергеевич,
аспирант,
ведущий инженер Лаборатории геологии нефти и газа,
Институт земной коры СО РАН,
г. Иркутск, Россия,
urenko240196@mail.ru.

Roman S. Urenko,
Postgraduate Student,
Leading Engineer of the Oil and Gas Laboratory,
Institute of the Earth's Crust, Siberian Branch of the Russian Academy of Sciences,
Irkutsk, Russia,
urenko240196@mail.ru.



Станевич Аркадий Михайлович,
доктор геолого-минералогических наук,
ведущий научный сотрудник Лаборатории геологии нефти и газа,
Институт земной коры СО РАН,
г. Иркутск, Россия,
stan@crust.irk.ru.

Arkadiy M. Stanevich,
Dr. Sci. (Geol. & Mineral.),
Leading Researcher of the Oil and Gas Laboratory,
Institute of the Earth's Crust, Siberian Branch of the Russian Academy of Sciences,
Irkutsk, Russia,
stan@crust.irk.ru.



Степанова Наталья Ивановна,
кандидат геолого-минералогических наук,
ведущий инженер Лаборатории геологии нефти и газа,
Институт земной коры СО РАН,
г. Иркутск, Россия,
nistepanova2014@yandex.ru.

Natalia I. Stepanova,
Cand. Sci. (Geol. & Mineral.),
Leading Engineer of the Oil and Gas Laboratory,
Institute of the Earth's Crust, Siberian Branch of the Russian Academy of Sciences,
Irkutsk, Russia,
nistepanova2014@yandex.ru.



Пуляевский Максим Сергеевич,
аспирант,
Иркутский национальный исследовательский технический университет,
г. Иркутск, Россия,
ведущий геолог управления
геологического сопровождения бурения скважин,
АО «Верхнечонскнефтегаз»,
г. Иркутск, Россия,
mspulyaevskiy@rosneft.ru.



Maksim S. Pulyaevskiy,
Postgraduate Student,
Irkutsk National Research Technical University,
Irkutsk, Russia,
Leading Geologist of the Department
of Geological Support of Well Drilling,
Verkhnechonskneftegaz JSC,
Irkutsk, Russia,
mspulyaevskiy@rosneft.ru.

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 09.06.2022; одобрена после рецензирования 06.07.2022; принятa к публикации 12.08.2022.

The article was submitted 09.06.2022; approved after reviewing 06.07.2022; accepted for publication 12.08.2022.



Научная статья

УДК 903.052

<https://doi.org/10.21285/2686-9993-2022-45-3-265-274>

Получение имитаций самородков золота с использованием медных сплавов

Вера Евгеньевна Сорокина^a, Марина Витальевна Константинова^b^{a,b}Иркутский национальный исследовательский технический университет, г. Иркутск, Россия

Автор, ответственный за переписку: Сорокина Вера Евгеньевна, vs_kina@mail.ru

Резюме. Имитации самородков золота являются материалом, представляющим в наши дни высокий интерес в области концептуального дизайна ювелирных изделий. Технология получения этого материала основана на литье расплавленной латуни в охлаждающую жидкость. Цель данного исследования заключалась в выявлении наиболее благоприятных технологических процессов для получения качественных имитаций самородков золота. В работе представлены результаты экспериментального исследования с использованием латуни марки Л63. Были установлены наиболее благоприятные технологические параметры: доведение температуры расплава до 970 ± 5 °C и использование в качестве охлаждающей жидкости воды температурой не более 20–25 °C. Соблюдение этих основных условий обеспечивает формирование отливок, внешне схожих с природными самородками золота, встречающимися в россыпных месторождениях. Образование сложных форм и неровного рельефа отливок, обеспечивающих данное сходство, связано со специфическими условиями кристаллизации латуни, отличающимися от условий кристаллизации при традиционном литье. В ходе исследования был проведен анализ химического состава образцов используемого сплава до испытаний и образцов, полученных в результате литья. В сплаве после обработки обнаружено незначительное уменьшение процентного содержания цинка и увеличение примесей, а именно кремния, серы, железа и хрома. Металлографический анализ показал однофазную микроструктуру в исходном образце латуни Л63, представляющую собой твердый раствор замещения цинка в меди. При аналогичном исследовании отливок, полученных в ходе эксперимента, помимо α -твердого раствора в их структуре было обнаружено наличие β -фазы, являющейся твердым раствором на базе химического соединения CuZn, которое положительно влияет на механические свойства латуни. Такая микроструктура характерна для сплавов, претерпевших ускоренное охлаждение, которое качественно меняет процесс превращения расплава в твердое вещество.

Ключевые слова: латунь, кристаллизация сплава, структура, имитации самородков золота**Для цитирования:** Сорокина В. Е., Константинова М. В. Получение имитаций самородков золота с использованием медных сплавов // Науки о Земле и недропользование. 2022. Т. 45. № 3. С. 265–274. <https://doi.org/10.21285/2686-9993-2022-45-3-265-274>.**Original article**

Producing gold nugget simulants using copper alloys

Vera E. Sorokina^a, Marina V. Konstantinova^b^{a,b}Irkutsk National Research Technical University, Irkutsk, Russia

Corresponding author: Vera E. Sorokina, vs_kina@mail.ru

Abstract. Today the imitations of gold nuggets are highly promising materials in conceptual jewelry design. The manufacturing technology of these materials is based on melted brass casting in a cooling liquid. The purpose of this research is to identify the most favorable technological processes to obtaining high-quality simulants of gold nuggets. The article presents the results of the experimental studies of CW508L brass. The most favorable technological parameters have been identified. They include the melt temperature up to 970 ± 5 °C and use of water with the temperature not higher than 20–25 °C as a cooling liquid. Adherence to the specifications allows to obtain the casts, which superficially resemble natural gold nuggets found in alluvial gold deposits. The casts' intricate shape and uneven relief providing this resemblance are due to the specific crystallization conditions of brass that differ from the crystallization conditions under conventional casting. The research involved the analysis of the chemical composition of the alloy samples before tests and the samples obtained after casting. After processing the alloy has featured an insignificant decrease in the zinc percentage, and an increase in the impurity content (silica, sulfur, iron, and chrome). The metallographic analysis of the initial sample of CW508L brass has shown a single-phase microstructure that is a solid solution of zinc substitution by copper. The similar study of the casts obtained in the experiment has shown the presence of a β -phase in their structure (along with an α solid solution)



that is a CuZn-based solid solution having a positive effect on brass mechanical properties. This microstructure is typical of the alloys undergone accelerated cooling that qualitatively changes the process of melt converting into a solid substance.

Keywords: brass, alloy crystallization, structure, gold nugget simulants

For citation: Sorokina V. E., Konstantinova M. V. Producing gold nugget simulants using copper alloys. *Nauki o Zemle i nedropol'zovanie = Earth sciences and subsoil use*. 2022;45(3):265-274. (In Russ.). <https://doi.org/10.21285/2686-9993-2022-45-3-265-274>.

Введение

Благодаря стремительному развитию технологий спектр материалов, применяемых в ювелирном дизайне, становится все шире и часто в украшениях используются такие синтетические материалы, как стекла, пластик, полимерная глина и прочее. Благодаря своим физическим и технологическим свойствам такие материалы пригодны для изготовления из них декоративных вставок: они могут выступать в роли имитаций драгоценных камней или же использоваться как самостоятельный материал. История ювелирного искусства богата примерами, когда в одном изделии классические ювелирные материалы сочетаются с традиционными. Такой контраст характерен для концептуального дизайна¹ [1].

Интерес к новым возможностям нетрадиционных материалов лег в основу серии экспериментов, направленных на разработку технологии получения эстетически привлекательных имитаций самородков золота, изготовленных из медного сплава. Данная технология использует нестандартную обработку, которая заключается в резком охлаждении металлического расплава путем литья в охлаждающую жидкость, в результате чего кристаллизация металла происходит в специфических условиях.

Материалы и методы исследования

Учитывая максимальную схожесть с золотом по физическим свойствам и эстетическим характеристикам для экспериментов по получению имитаций самородков золота была выбрана латунь марки Л63² [2, 3]. Это двухкомпонентный сплав, в основе которого содержится 62–65 % меди, легированной 34,5–37,5 % цинка, а также до 0,5 % примесей³ [4].

Целью проведенных экспериментов являлось выявление условий, позволяющих получить отливки, сходные по форме и внешнему виду с природными золотыми самородками. Предварительно были определены критерии оценки отливок, обеспечивающие ожидаемое сходство [5].

Экспериментальный процесс заключался в плавлении исходного сплава марки Л63 при помощи бензиновой горелки до достижения однородного расплавленного состояния и резком его охлаждении в жидкой среде. В качестве охлаждающей жидкости была использована вода девяти температурных режимов: 0–5, 10–15, 20–25, 30–35 °C и так далее до 80–85 °C. Температура отливающего расплава была неизменной – 970±5 °C, ее замеры производились при помощи инфракрасного пирометра HoldPeak HP-1300. Количество исходного сплава при каждом плавлении было неизменным и составляло 3 г (±0,1 г).

Результаты исследования и их обсуждение

Литье латунного расплава в воду температурой до 25 °C позволило получить отливки с нужными эстетическими характеристиками: они обладают золотисто-желтым цветом с ярким металлическим блеском, неправильными сложными формами и неровным рельефом (рис. 1, a). Увеличение температуры воды приводит к образованию более простых форм, появлению оксидов на поверхности образцов и потускнению блеска. При повышении температуры охлаждающей жидкости до 80–85 °C образуются почти круглые отливки с относительно ровным рельефом поверхности. Блеск в них практически отсутствует из-за наличия плотной пленки оксидов (рис. 1, b) [6, 7].

¹ Куманин В. И., Лившиц В. Б. Материалы для ювелирных изделий: учебник. М.: Астрель – Кладезь, 2012. 223 с.

² Колачев Б. А., Ливанов В. А., Елагин В. И. Металловедение и термическая обработка цветных металлов и сплавов: учебник. М.: Металлургия, 1981. 416 с.

³ Copper and copper alloys: ASM specialty handbook / ed. J. R. Davis. Russell: ASM International, 2001. 652 p.

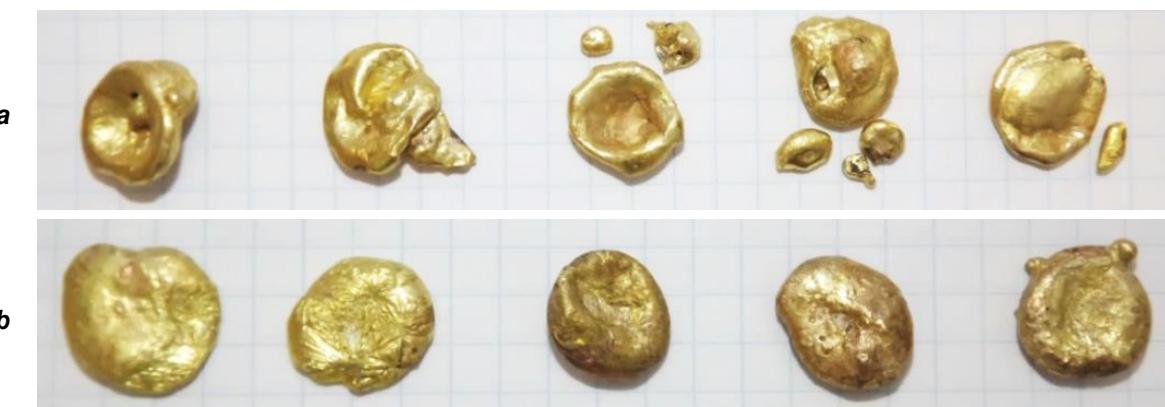


Рис. 1. Образцы, полученные литьем расплавленной латуни в воду температурой 10–15 °C (а) и 80–85 °C (б)
Fig. 1. Samples obtained by brass water casting at the temperature of 10–15 °C (a) and 80–85 °C (b)

В образцах, полученных в холодной воде (до 20–25 °C), следы оксидов отсутствуют либо наблюдаются в небольшом количестве лишь на обратной стороне отливки. Текстура поверхности достаточно ровная, без мелких макроскопических выпуклостей или углублений, сохраняется яркий металлический блеск. Именно такие образцы по внешнему виду имеют максимальную схожесть с золотыми самородками, а потому соответствуют критериям заявленной цели (рис. 2). Характер рельефа поверхности таких отливок значительно отличается от образцов, полученных в горячей воде, поверхность которых имеет лишь несколько крупных выступов и вмятин [8].

Время нахождения латуни в расплавленном состоянии должно быть минимальным, поскольку цинк в ее составе является летучим металлом. В случае продолжительного нагрева расплава наблюдается интенсивное испарение этого металла, что легко определяется визуально благодаря появлению пламени синего цвета и образованию белого налета на стенах тигля. Испарение цинка наблюдается

при достижении сплава жидкого состояния и происходит более интенсивно при повышенной температуре (больше 950 °C) [9]. Количество потерь летучих компонентов в сплаве зависит от продолжительности его нахождения в жидкому состоянии и от площади свободной поверхности металлического расплава. В качестве защитного покрова, уменьшающего свободную поверхность расплава, в процессе плавления необходимо использовать буру [10].

Чтобы проконтролировать, как изменялся состав латуни в процессе расплавления и литья и насколько велики потери цинка, был произведен химический анализ сплава с использованием рентгенофлуоресцентного анализатора металлов и сплавов S1 Titan, который применяется в различных отраслях промышленности для неразрушающего химического анализа. Оценивалось содержание меди, цинка и прочих элементов, среди которых кремний, сера, железо и хром. Результаты химического анализа образцов латуни приведены в таблице.



Рис. 2. Сравнение внешнего вида природного золотого самородка (а) и его имитации из расплавленной латуни, отлитой в холодную воду (б)

Fig. 2. Comparison of the natural gold nugget (a) and its brass simulant obtained by casting in cold water (b)

Результаты химического анализа образцов латуни марки Л63 при разных условиях экспериментов **Results of the chemical analysis for CW508L brass samples under different experimental conditions**

Состояние	Состав латуни, %		
	Cu	Zn	Прочее
Исходное состояние сплава до испытаний	63,63	35,92	0,45
Сплав, отлитый в воду температурой 0–5 °C	65,02	33,39	1,59
Сплав, отлитый в воду температурой 10–15 °C	65,02	33,37	1,61
Сплав, отлитый в воду температурой 70–75 °C	65,65	33,49	0,86
Сплав, отлитый в воду температурой 80–85 °C	65,43	33,52	1,05

Сравнение полученных результатов позволяет сделать вывод, что во всех случаях происходило изменение состава сплава в сторону уменьшения содержания цинка. Максимальные потери цинка и увеличение процентного содержания примесей наблюдались при литье латуни в холодную воду. В среднем потери цинка при таком способе плавления и литья латуни составляли не более 3 % от общего объема. Такое количество потерь не имеет большого значения: оно существенно не влияет ни на прочность полученных образцов, ни на их цвет [11].

Структура двухкомпонентных латуней отвечает равновесной диаграмме состояния «медь – цинк» (рис. 3).

В отличие от большинства сплавов, в которых, как правило, увеличение прочности сопровождается уменьшением пластичности, в ряде медных сплавов при увеличении концентрации цинка в меди примерно до 30 % одновременно увеличивается и прочность, и пластичность⁴. Структура латуни при этом является твердым раствором замещения цинка в меди [12, 13]. Латунь в данной ситуации имеет однофазную структуру твердого раствора замещения цинка в меди (α -фаза) с кубической гранецентрированной решеткой. Если содержание цинка превышает 39 %, в структуре появляется хрупкая β -фаза – упорядоченный твердый раствор на основе электронного соединения типа 3/2 CuZn с объемно-центриро-

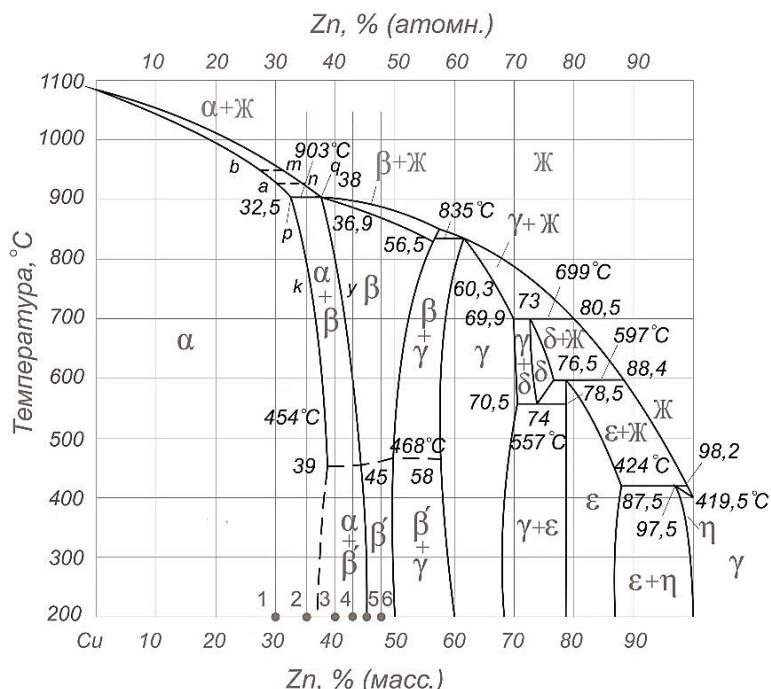


Рис. 3. Диаграмма состояния «медь – цинк»⁵

⁴ Плошкин В. В. Материаловедение: учебник. М.: Юрайт, 2019. 463 с.

⁵ Copper and copper alloys: ASM specialty handbook / ed. J. R. Davis, Russell: ASM International, 2001. 652 p.



ванной кубической решеткой, при этом происходит резкое понижение пластичности. Прочность увеличивается до концентрации цинка 45 %, а затем резко уменьшается, так как в структуре присутствует только β -фаза^{6,7}.

При литье латуни в воду получаются образцы характерной формы, поскольку содержащее влияние стенок литейной формы, имеющееся при обычных процессах литья, отсутствует. Также во многих отливках наблюдаются поры и внутренние пустоты, в образовании которых могут участвовать внутриметаллические газы, такие как водород, кислород и азот [14–16]. При этом структура формируется в специфических условиях.

Основные положения теории кристаллизации состоят в следующем: расплавленный металл не имеет правильного кристаллического строения, однако в нем наблюдаются группы атомов с правильным расположением частиц, близким к строению кристаллизующегося вещества⁸. Переход металлического вещества из одной фазы в другую (превращение расплава в кристаллическое состояние) происходит за счет возникновения в жидкой фазе небольших объемов новой фазы – центров кристаллизации или зародышевых центров и их последующего роста. При температурах, близких к температуре плавления (кристаллизации), в жидком металле области с близким порядком имеют такую же атомную упаковку, как кристалл, и могут стать зародышем твердой фазы [17, 18].

Процесс кристаллизации запускается при условии наличия определенной степени переохлаждения вещества. Она обусловливается разностью между теоретической и реальной температурой начала кристаллизации. Кристаллизация сплава происходит при понижении температуры и заканчивается при достижении температуры солидуса⁹.

При кристаллизации сплавов для образования зародыша необходимо наличие струк-

турных, концентрационных и энергетических флуктуаций, появление новых зародышей кристаллизации в единице объема расплава является случайным [19]. Их рост обеспечивается благодаря присоединению к ним свободных атомов из окружающего расплава. Способностью к росту обладают зародыши размером не менее критического, величина которого зависит от степени переохлаждения. Скорость образования новых центров кристаллизации и скорость роста кристаллов с сторону жидкого расплава зависят от степени переохлаждения¹⁰. Чем она выше, тем больше зародышей успевает образоваться в единицу времени в единице объема.

В результате кристаллизации металл в твердом состоянии состоит из множества кристаллитов неправильной формы, поэтому структура металла называется поликристаллической¹¹. Форма и размер зерна зависят от условий кристаллизации, в частности скорости и направления теплоотвода. Структура литого сплава зачастую имеет характерное дендритное строение. При наличии широкого температурного интервала кристаллизации может возникать дендритная ликвация.

Высокая скорость охлаждения вызывает значительное переохлаждение расплава, которое может доходить до нескольких сотен градусов. Такие условия качественно меняют процесс перехода расплава из жидкого состояния в твердое. Если кристаллизация сплава, структура которого представляет собой твердый раствор замещения, проходила в обычных условиях без переохлаждения, то по ее завершении этот сплав будет являться однородным твердым раствором с тем же составом, что и исходный расплав. Ускоренное охлаждение приводит к уменьшению скорости диффузии и росту вязкости, в результате чего строение формирующихся кристаллитов и их состав получаются иными. При определенных условиях кристаллизация расплава вообще

⁶ Плошкин В. В. Материаловедение: учебник. М.: Юрайт, 2019. 463 с.

⁷ Ullmann F., Gerhartz W. Ullmann's encyclopedia of industrial chemistry. Weinheim: VCH, 1996. 560 p.

⁸ Мальцев М. В., Барсукова Т. А., Борин Ф. А. Металлография цветных металлов и сплавов: учеб. пособие. М.: Металлургиздат, 1960. 372 с.

⁹ Новиков И. И. Материаловедение, термообработка и рентгенография: учебник. М.: Изд-во МИСИС, 1994. 478 с.

¹⁰ Мальцев М. В., Барсукова Т. А., Борин Ф. А. Металлография цветных металлов и сплавов: учеб. пособие. М.: Металлургиздат, 1960. 372 с.

¹¹ Там же.



не происходит, а образуется аморфная металлическая масса, не имеющая кристаллического строения¹² [16]. Для получения аморфного металла нужна чрезвычайно высокая скорость охлаждения (около 1000 К/с). Такую скорость невозможно достичь при обычных условиях кристаллизации. Тонкие пленки аморфных металлов получают напылением атомов на охлажденную подложку или конденсацией паров металла. Также аморфные металлы возможно получить путем электрохимического осаждения и при облучении кристаллических металлов интенсивными потоками ионов или нейтронов [10, 14].

Чтобы установить, каким образом на получаемый результат влияют условия охлаждения при литье латуни в воду, был проведен металлографический анализ полученных образцов. Для этого было изучено строение двух отливок, одна из которых сформировалась при литье расплава в воду 0–5 °С, а другая – в воду 80–85 °С.

Из данных отливок были изготовлены шлифы, для этого одна сторона отливки была обработана грубым напильником до образования плоской поверхности диаметром 5–6 мм. Для снижения степени шероховатости полученная плоскость последовательно была отшлифована наждачной бумагой, начиная с крупнозернистой и заканчивая мелкозернистой, чтобы исключить риски и царапины. После шлифовки подготовленные поверхности образцов были отполированы и протравлены в течение 10 секунд в растворе соляной кис-

лоты и хлорного железа, смешанных в соотношении 2:1. Таким же образом для сравнения был изготовлен микрошлиф из исходного сплава – из пластины латуни марки Л63, которая и была использована во всех сериях экспериментов.

Наблюдение проводилось при 400-кратном увеличении с использованием поляризационного микроскопа OLIMPUS BX51.

Строение латуни марки Л63 в состоянии поставки представляет собой полиэдрические зерна с отдельными двойниками (рис. 4), что свидетельствует о том, что это однофазная латунь в отожженном состоянии. Структура отожженного металла отвечает диаграмме состояния, и при содержании цинка 37 % представляет собой твердый раствор замещения цинка в меди^{13,14}.

В том случае, если охлаждение сплава протекает медленно, в процессе кристаллизации сохраняются условия, в которых диффузия проходит до конца – как в жидкой, так и в твердой фазе. Составы этих фаз при любой температуре отвечают равновесной диаграмме состояния [20]. В начале кристаллизации из жидкого расплава формируются зерна α -фазы. При достижении температуры 903 °С происходит перитектическое превращение, которое протекает в условиях недостатка жидкой фазы, что приводит к формированию в сплаве структуры, содержащей кристаллы и α , и β -фазы. Выше температур 450–470 °С β -фаза является неупорядоченным раствором. Ниже этого температурного порога происходит



Рис. 4. Микроструктура латуни марки Л63, исходный образец (увеличение 400x)
Fig. 4. Microstructure of CW508L brass, initial sample (400x magnification)

¹²Куманин В. И., Лившиц В. Б. Материалы для ювелирных изделий: учебник. М.: Астрель – Кладезь, 2012. 223 с.

¹³Новиков И. И. Металловедение, термообработка и рентгенография: учебник. М.: Изд-во МИСИС, 1994. 478 с.

¹⁴McCreight T. The complete metalsmith: an illustrated handbook. Worcester: Davis Publications, 1991. 208 p.



упорядочение: в центре куба располагается атом цинка, а в его вершинах – атомы меди. Поскольку с понижением температуры увеличивается растворимость атомов цинка в меди, дальнейшее охлаждение сплава приводит к полному растворению фазы β в α -фазе. При комнатной температуре концентрация цинка в меди составляет 39 %. Таким образом, получается однофазный сплав со структурой α -твердый раствор [12, 19].

Если условия, при которых происходит кристаллизация, далеки от равновесных, как это было в экспериментах с охлаждающей жидкостью, то диффузионные процессы отстают от скорости кристаллизации. Это приводит к тому, что зерно формируется неравномерно: состав твердого раствора не успевает выравниваться по сечению зерна, возникает дендритная ликвация. Чем выше степень скорости охлаждения сплава, тем быстрее протекает процесс кристаллизации и тем существенней будет отличаться в результате его структура от равновесной. Особенно заметно это проявляется в сплавах, в которых имеет место перитектическое превращение, например в латунях.

Металлографический анализ образцов латуни марки Л63, полученных литьем в воду, показал, что структура сплава в литом состоянии похожа на структуру двухфазных латуней (рис. 5). В структуре образцов латуни, по-

лученных в ходе проведенных экспериментов, наблюдаются характерные светлые дендриты α -твердого раствора, окруженные темными выделениями β -фазы. Практика показывает, что в производственных условиях охлаждения даже в сплавах с 32 % цинка можно обнаружить присутствие кристаллов β -фазы [6, 9]. Тем вероятнее ее присутствие в сплаве с содержанием цинка 37 % при литье в воду. Объясняется это тем, что в условиях ускоренного охлаждения точки линии неравновесного солидуса, характеризующие состав α -твердого раствора, оказываются смещеными в область меньших концентраций цинка. Таким образом, раствор обогащен медью, то есть содержит меньше цинка. Доля же β -фазы при перитектическом превращении оказывается больше, чем при протекании равновесных процессов. В таком количестве при ускоренном охлаждении она не успевает раствориться в α -фазе полностью, оставаясь в структуре сплава.

Образование некоторого количества избыточной β -фазы в структуре сплава повышает его твердость и износостойкость, что может оказаться полезным при использовании такого сплава в ювелирном дизайне с точки зрения его эксплуатационных свойств¹⁵.

Примечательно, что микроструктура представленных для анализа образцов между собой также отличается (см. рис. 5). Размеры

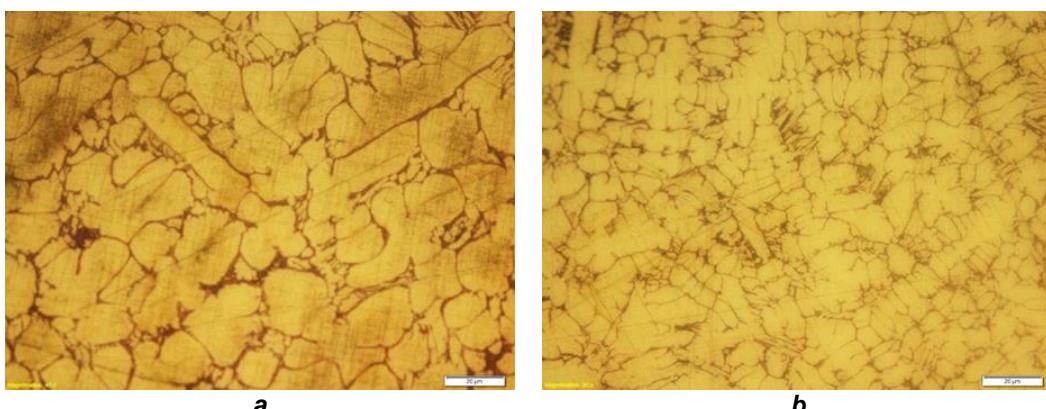


Рис. 5. Микроструктура образцов литой латуни (увеличение 400x):

a – образец, полученный литьем в воду температурой 80–85 °C;

b – образец, полученный литьем в воду температурой 0–5 °C

Fig. 5. Microstructure of the cast brass samples (400x magnification):

a – a sample obtained by water casting at 80–85 °C;

b – a sample obtained by water casting at 0–5 °C

¹⁵ Колачев Б. А., Ливанов В. А., Елагин В. И. Металловедение и термическая обработка цветных металлов и сплавов: учебник. М.: Металлургия, 1981. 416 с.



кристаллитов α -фазы в образце, отлитом в холодную воду, гораздо меньше размеров зерен отливки, полученной в горячей воде. Это значит, что использование охлаждающей жидкости более низкой температуры позволяет достичь большей степени переохлаждения и, следовательно, более высокой скорости зарождения центров кристаллизации в расплаве. Измельчение зерна также более благоприятно оказывается на механических свойствах сплава.

Заключение

Таким образом, в ходе экспериментального исследования литья латуни в охлаждающую жидкость и анализа его результатов были выявлены необходимые технологические параметры. В результате для достижения поставленной цели получения качественных имитаций самородков золота рекомендовано литье латуни в холодную воду температурой до 20–25 °C.

Список источников

1. Ольвер Э. Искусство ювелирного дизайна: от идеи до воплощения / пер. с англ. Омск: Дедал-Пресс, 2008. 172 с.
2. Петровская Н. В. Золотые самородки. М.: Наука, 1993. 190 с.
3. Потемкин С. В. Благородный 79-й: очерк о золоте. М.: Недра, 1988. 176 с.
4. Зябнева О. А., Лившиц В. Б., Комиссарова Л. А. Изготовление художественных изделий из медных сплавов // Литейное производство. 2022. № 2. С. 32–34.
5. Сорокина В. Е., Лобацкая Р. М. Эксперименты по получению имитаций самородных металлов для использования в ювелирном дизайне // Дизайн. Теория и практика. 2014. № 15. С. 53–64.
6. McCreight T. Jewelry: fundamentals of metalsmithing. Rockport: Hand Books Press, 1997. 140 р.
7. Сорокина В. Е. О формировании отливок из сплава Cu-Zn в условиях ускоренного охлаждения // Литейное производство. 2017. № 9. С. 18–21.
8. Сорокина В. Е. Особенности кристаллизации латуни в охлаждающей жидкости // Вестник Иркутского государственного технического университета. 2017. Т. 21. № 6. С. 128–134. <https://doi.org/10.21285/1814-3520-2017-6-128-134>.
9. Gray L. Zinc. Tarrytown: Marshall Cavendish, 2006. 425 p.
10. Ammen C. W. Metalcasting. New York: McGraw-Hill, 2000. 450 р.
11. Кусаинов Е. Н., Константинова М. В., Сорокина В. Е. Особенности формирования структуры сплавов в условиях ускоренного охлаждения // Перспективы развития технологии переработки углеводородных и минеральных ресурсов: материалы VI Всерос. науч.-практ. конф. с междунар. участием. Иркутск: Изд-во ИрГТУ, 2016. С. 34–36.
12. Хансен М., Андерко К. Структуры двойных сплавов / пер. с нем. В 2 т. М.: Металлургиздат, 1962. 1488 с.
13. Лившиц В. Б. Технология литья художественных изделий. М.: ЛЕНАНД, 2014. 260 с.
14. Sorokina V. E. Technology of obtaining gold and silver imitation nuggets for jewelry design purposes // IOP Conference. Series: Earth and Environmental Science. 2019. Vol. 229. P. 012004. <https://doi.org/10.1088/1755-1315/229/1/012004>.
15. Чернега Д. Ф., Бялик О. М., Иванчук Д. Ф., Ремизов Г. А. Газы в цветных металлах и сплавах. М.: Металлургия, 1982. 176 с.
16. Sar-el H. Z. A new technique for the determination of gases in metals // Applications of Surface Science. 1978. Vol. 1. Iss. 3. P. 414–417. [https://doi.org/10.1016/0378-5963\(78\)90042-9](https://doi.org/10.1016/0378-5963(78)90042-9).
17. Scott D. A. Copper and bronze in art: corrosion, colorants, conservation. Los Angeles: Getty Publications, 2002. 533 р.
18. Кнорозов Б. В., Усова Л. Ф., Третьяков А. В., Китаев Я. А., Филькин В. М., Шевченко А. А. [и др.]. Технология металлов и материаловедение. М.: Металлургия, 1987. 800 с.
19. Коттрелл А. Х. Строение металлов и сплавов / пер. с англ. М.: Металлургиздат, 1961. 288 с.
20. Ефремов Б. Н. Латуни. От фазового строения к структуре и свойствам: монография. М.: ИНФРА-М, 2014. 312 с.

References

1. Olver E. The art of jewelry design: from idea to reality; 2002. 160 p. (Russ. ed.: *Iskusstvo yuvelirnogo dizaina. ot idei do voploscheniya*. Omsk: Dedal-Press; 2008. 172 p.).
2. Petrovskaya N. V. Gold nuggets. Moscow: Nauka; 1993. 190 p. (In Russ.).
3. Potemkin S. V. Noble 79th: an essay on gold. Moscow: Nedra; 1988. 176 p. (In Russ.).
4. Zyabneva O. A., Livshits V. B., Komissarova L. A. Manufacturing of artistic ware from copper alloys. *Litelnaya proizvodstvo* = *Foundry. Technologies and Equipment*. 2022;2:32-34. (In Russ.).
5. Sorokina V. E., Lobatskaya R. M. Experiments on making simulants of native metals for jewelry design. *Dizain. Teoriya i praktika*. 2014;15:53-64. (In Russ.).
6. McCreight T. Jewelry: fundamentals of metalsmithing. Rockport: Hand Books Press; 1997. 140 p.
7. Sorokina V. E. On formation of Cu-Zn alloy castings under accelerated cooling. *Litelnaya proizvodstvo*.



2017;9:18-21. (In Russ.).

8. Sorokina V. E. Features of brass crystallization in cooling liquid. *Vestnik Irkutskogo gosudarstvennogo tekhnicheskogo universiteta = Proceedings of Irkutsk State Technical University.* 2017;21(6):128-134. (In Russ.). <https://doi.org/10.21285/1814-3520-2017-6-128-134>.

9. Gray L. *Zinc*. Tarrytown: Marshall Cavendish; 2006. 425 p.

10. Ammen C. W. *Metalcasting*. New York: McGraw-Hill; 2000. 450 p.

11. Kusainov E. N., Konstantinova M. V., Sorokina V. E. Alloy structure formation features under accelerated cooling. In: *Perspektivy razvitiya tekhnologii pererabotki uglevodorochnykh i mineral'nykh resursov: materialy VI Vsesoyuznogo nauch.-prakt. konf. s mezhdunar. uchastiem = Development prospects of processing technologies for hydrocarbon and mineral resources: materials of the 6th All-Russian scientific and practical conference with international participation*. Irkutsk: Irkutsk State Technical University; 2016, p. 34-36. (In Russ.).

12. Hansen M. Der Aufbau der Zweistofflegierungen; 1936. 1100 s. (Russ. ed.: *Struktury dvoinykh splavov*. Moscow: Metallurgizdat; 1962. 1488 p.).

13. Livshits V. B. *Technology of ornamental castings*. Moscow: LENAND; 2014. 260 p. (In Russ.).

14. Sorokina V. E. Technology of obtaining gold and silver imitation nuggets for jewelry design purposes. *IOP Conference. Series: Earth and Environmental Science.* 2019;229:012004. <https://doi.org/10.1088/1755-1315/229/1/012004>.

15. Chernega D. F., Byalik O. M., Ivanchuk D. F., Remizov G. A. *Gases in non-ferrous metals and alloys*. Moscow: Metallurgiya; 1982. 176 p. (In Russ.).

16. Sar-el H. Z. A new technique for the determination of gases in metals. *Applications of Surface Science.* 1978;1(3):414-417. [https://doi.org/10.1016/0378-5963\(78\)90042-9](https://doi.org/10.1016/0378-5963(78)90042-9).

17. Scott D. A. *Copper and bronze in art: corrosion, colorants, conservation*. Los Angeles: Getty Publications; 2002. 533 p.

18. Knorozov B. V., Usova L. F., Tret'yakov A. V., Kitaev Ya. A., Fil'kin V. M., Shevchenko A. A., et al. *Technology of metals and materials science*. Moscow: Metalurgiya; 1987. 800 p. (In Russ.).

19. Cottrell A. H. *Theoretical structural metallurgy*; 1961. 288 p. (Russ. ed.: *Stroenie metallov i splavov*. Moscow: Metallurgizdat; 1961. 288 p.).

20. Efremov B. N. *Brass. From phase organization to structure and properties*. Moscow: INFRA-M; 2014. 312 p. (In Russ.).

Информация об авторах / Information about the authors



Сорокина Вера Евгеньевна,
кандидат технических наук,
доцент кафедры ювелирного дизайна и технологий,
Институт недропользования,
Иркутский национальный исследовательский технический университет,
г. Иркутск, Россия,
vs_kina@mail.ru.

Vera E. Sorokina,
Cand. Sci. (Eng.),
Associate Professor of the Department of Jewelry Design and Technologies,
Institute of Subsoil Use,
Irkutsk National Research Technical University,
Irkutsk, Russia,
vs_kina@mail.ru.



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.

Marina V. Konstantinova,
Cand. Sci. (Chem.), Associate Professor,
Associate Professor of the Department of Materials Science,
Welding and Additive Technologies,
Institute of Aircraft Engineering and Transport,
Irkutsk National Research Technical University,
Irkutsk, Russia,
mavikonst@mail.ru.

**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 03.06.2022; одобрена после рецензирования 26.07.2022; принятa к публикации 30.08.2022.

The article was submitted 03.06.2022; approved after reviewing 26.07.2022; accepted for publication 30.08.2022.



ГЕОЭКОЛОГИЯ

Научная статья

УДК 551+628.4.036(571.62)

<https://doi.org/10.21285/2686-9993-2022-45-3-275-284>



Геоэкологические условия Хабаровской агломерации для размещения строительных отходов

Валерий Викторович Кулаков^a, Вадим Эдуардович Пасичников^b

^{a,b}Институт водных и экологических проблем ДВО РАН, г. Хабаровск, Россия

Автор, ответственный за переписку: Кулаков Валерий Викторович, vvkulakov@mail.ru

Резюме. Целью представленного исследования являлась геоэкологическая оценка территории Хабаровской агломерации относительно возможности размещения на рассматриваемой территории отходов строительства и сноса или повторного их использования, а также влияния этих отходов на окружающую среду. Ежегодный объем образования строительных отходов в г. Хабаровске составляет 407,5 тыс. т (326,9 тыс. м³). Все отходы строительного сектора Хабаровской агломерации отправляются на захоронение. В исследуемой области выделяются два района: район поймы и надпойменных террас Амура в западной части, затапливаемый в периоды высоких и катастрофических наводнений и характеризующийся неблагоприятными геоэкологическими условиями, а также район правобережья Амура в восточной части площади, где располагается городская застройка и залегание уровней подземных вод превышает 2 м. В ходе исследования авторами выявлены места потенциального расположения комплекса по переработке строительных отходов с возможностью обустройства площадки для временного хранения сырья, представлено обоснование данного выбора. Описаны методы, применимые в сфере оборота отходов при формировании отрасли переработки отходов строительства и сноса. Данна оценка потенциальной возможности использования отходов как материальных ресурсов и экологических аспектов их вторичного использования в виде строительных материалов. Отмечено, что к 2030 году в результате размещения отходов на полигонах твердых коммунальных отходов углеродный след составит 116,8 тыс. т углекислого газа. Для сокращения углеродного следа (выбросов углекислого газа) при строительных работах с использованием бетона и асфальтобетона обосновано применение переработанных заполнителей на основе вторичного щебня. Участки, благоприятные для размещения предприятий по переработке строительных отходов, выявлены при обследовании территории города. Они расположены за пределами существующей и перспективной городской и промышленной застройки, а также вне зон особо охраняемых природных территорий.

Ключевые слова: геоэкологические условия, подземные воды, строительные отходы, Хабаровск

Финансирование: Исследования выполнены в рамках государственного задания Института водных и экологических проблем ДВО РАН и гранта Правительства Хабаровского края в области охраны окружающей среды от 25 декабря 2020 г.

Для цитирования: Кулаков В. В., Пасичников В. Э. Геоэкологические условия Хабаровской агломерации для размещения строительных отходов // Науки о Земле и недропользование. 2022. Т. 45. № 3. С. 275–284.
<https://doi.org/10.21285/2686-9993-2022-45-3-275-284>.

GEOECOLOGY

Original article

Geoecological conditions of the Khabarovsk agglomeration for construction waste disposal

Valeriy V. Kulakov^a, Vadim E. Pasichnikov^b

^{a,b}Institute of Water and Environmental Problems, Far Eastern Branch
of the Russian Academy of Sciences, Khabarovsk, Russia
Corresponding author: Valeriy V. Kulakov, vvkulakov@mail.ru

© Кулаков В. В., Пасичников В. Э., 2022



Abstract. This research is aimed at the geoecological assessment of the territory of the Khabarovsk agglomeration in terms of location possibility of construction and demolition waste or recycling of the latter, as well as the environmental impact of the waste. The annual volume of construction waste generation in Khabarovsk is 407.5 thousand tons (326.9 thousand m³). All waste from the construction sector of the Khabarovsk agglomeration is sent to landfills. The study territory distinguishes two areas: the one of the flood plain and above-floodplain terraces of the Amur river in the western part, which is flooded in the periods of high and catastrophic floods and features unfavorable geoecological conditions, and the area on the right bank of the Amur river in the eastern part of the territory with urban development where the groundwater levels exceed 2 m. In the course of the study, the authors identified the potential locations of the construction waste recycling complex and considered the possibility of arranging a site for temporary storage of raw materials having given the rationale for this choice. The methods applicable in the field of waste recycling under the formation of the construction and demolition waste processing industry are described. The potential of using waste as material resources as well as the environmental aspects of waste recycling in the form of building materials are evaluated. It is noted that by 2030, the carbon footprint will be 116.8 thousand tons of carbon dioxide as a result of waste disposal at municipal solid waste landfills. To reduce the carbon footprint (carbon dioxide emissions) during the construction works involving concrete and bituminous concrete it is justified the use of processed aggregates based on recycled crushed stone. The sites favorable for the placement of construction waste recycling enterprises have been identified during the survey of the city. They are located outside the existing and prospective urban and industrial development, as well as outside the zones of specially protected natural areas.

Keywords: geoecological conditions, groundwater, construction waste, Khabarovsk

Funding: The research was carried out within the framework of the state assignment of the Institute of Water and Environmental Problems of the Far Eastern Branch of the Russian Academy of Sciences and the grant of the Khabarovsk Territory Government in the field of the environmental protection of December 25, 2020.

For citation: Kulakov V. V., Pasichnikov V. E. Geoecological conditions of the Khabarovsk agglomeration for construction waste disposal. *Nauki o Zemle i nedropol'zovanie = Earth sciences and subsoil use*. 2022;45(3):275-284. (In Russ.). <https://doi.org/10.21285/2686-9993-2022-45-3-275-284>.

Введение

Серьезной проблемой в наши дни является то, что в ходе строительства, а также сноса физически и морально устаревшего жилищного и производственного фонда зданий должным образом не учитывается фактор экологического воздействия отходов строительства и сноса на окружающую среду. Тем не менее в рамках применения технологии механизированного сноса генерируется ряд отрицательных экологических факторов, таких как выбросы парниковых газов, загрязнение почвы отходами горюче-смазочных материалов, загрязнение подземных вод, ветровой пылевой перенос за территорию участка и др. В свою очередь, при соблюдении технологии бережной разборки общая масса строительного мусора представляет собой внушительный перечень вторичных ресурсов (металлические, минеральные, органические, полимерные, смешанные), технологии переработки которых успешно применяются во многих странах мира.

Необходимость утилизации строительных отходов предусмотрена Стратегией развития промышленности по обработке, утилизации и обезвреживанию отходов производства и потребления на период до 2030 года¹. К сожалению, несмотря на это, непосредственно проблеме управления отходами строительного производства в большинстве регионов России на сегодняшний день не уделяется должного внимания – исключением является лишь столица России г. Москва и Московская область [1].

В связи со всем вышеперечисленным в рамках проведенного исследования авторы поставили своей задачей идентифицировать наиболее значимые геоэкологические условия на площади Хабаровской агломерации для размещения строительных отходов и их техногенные воздействия на окружающую среду, а также на основе объемов образования отходов строительства и сноса ветхого жилья в городе оценить наиболее благоприятные участки для их размещения и экологи-

¹ Об утверждении Стратегии развития промышленности по обработке, утилизации и обезвреживанию отходов производства и потребления на период до 2030 года: распоряжение Правительство Российской Федерации от 25 января 2018 года № 84-р [Электронный ресурс]. URL: <https://docs.cntd.ru/document/556353696?marker=6540IN> (15.06.2022).



ческие аспекты вторичного использования строительных материалов.

Материалы и методы исследования

Территория г. Хабаровска расположена на правом берегу Амура и Амурской протоки и протягивается вдоль них от Воронежских высот до предгорий хребта Большой Хехцир на расстояние более 40 км [2]. Рельеф Хабаровска и его окрестностей определяется особенностями морфологии обширной Среднеамурской низменной равнины с присущими ей морфологическими элементами: горами с отрогами, холмисто-увалистой и низменной заболоченной равниной. Наибольшая высота хребта Большой Хехцир достигает 849,6 м, а его территория имеет густую речную сеть. Низменная Среднеамурская равнина характеризуется высотой 30–70 м над уровнем моря. Водный режим рек и ручьев определяется дождевым стоком (до 80 %) и муссонными паводками в летний период [3–5].

Площадь г. Хабаровска и его окрестностей (Хабаровская агломерация) имеет весьма разнообразное геологическое строение и резко различные геоэкологические (гидрогеологические и инженерно-геологические) условия. Сведения о геологическом строении, тектонике, геоморфологии, гидро-геологии, инженерной геологии и опасных экзогенных геологических процессах данной агломерации были опубликованы в многочисленных научных работах [2, 6, 7].

Теория и практика обращения с отходами строительства и сноса, их утилизации, переработки и реализации, являющаяся важной частью проведенного авторами исследования, отражена в трудах российских и иностранных ученых [8–10]. Передовые позиции в этих исследованиях занимают ученые из Евросоюза, Азии, Австралии и Северной Америки [11–15].

Оценка объемов образования отходов сноса ветхого жилья в г. Хабаровске и углеродного следа от их реализации позволяет говорить о реальной нагрузке строительства и жилищно-коммунального хозяйства на элементы окружающей среды [1]. При анализе экологических аспектов авторами данного

исследования выделены три основных потока: вторичные материальные ресурсы, образуемые при сносе ветхого фонда; отходы текущего ремонта помещений, которые формируются в условиях жестко сложившихся границ застройки и оказывают прямое влияние на комфорт и безопасность людей, проживающих в многоквартирных домах [16]; подбор строительных материалов с учетом оценки жизненного цикла [17].

Все исследования, проводившиеся ранее, позволяют косвенно оценить геоэкологическую обстановку района г. Хабаровска, тем не менее они не дают цельного представления для научно обоснованного перспективного планирования размещения полигонов строительных отходов. В представленном в настоящей статье исследовании на основе анализа суммы приведенных выше факторовдается оценка геоэкологических условий территории Хабаровской агломерации, а также проводится районирование ее на зоны различной степени опасности согласно этим условиям. Данное районирование позволит более рационально использовать городскую и прилегающую к ней территорию для размещения и строительства различных сооружений и полигонов твердых бытовых и строительных отходов и составить объективное представление о вероятных изменениях геологической среды в результате влияния антропогенных факторов. Создание комплекса по переработке строительных отходов предполагает соблюдение требований экологического и социально-экономического благополучия граждан. С целью соблюдения этого требования был произведен анализ территории Хабаровской агломерации, направленный на выявление мест потенциального расположения подобных комплексов.

В ходе исследования была использована система геоэкологических, инженерно-технических и экономических методов для формирования отрасли переработки отходов строительства и сноса на территории Хабаровской агломерации с использованием зарубежного опыта управления строительными отходами. К данным методам относятся:

- принцип «3R» (от англ: reduce, reuse, recycle – сокращение, повторное использо-



вание, переработка) (использован в ходе реализации национального проекта «Жилье и городская среда» в г. Хабаровске);

– методы «бережной разборки», раздельного сбора и реализации отходов демонтажа [1], метод подбора строительных материалов на этапе проектирования с учетом жизненно-го цикла и экологического аспекта [17];

– принцип цифровизации процессов (разработана модель автоматизированной информационной системы оборота отходов текущего ремонта помещений на примере г. Хабаровска) [16].

Результаты исследования и их обсуждение

Отходами строительства и сноса являются отходы (за исключением высокого и чрезвычайно опасных), получаемые в результате строительства или ремонта, реконструкции, разборки и сноса зданий, сооружений, инженерных коммуникаций и промышленных объектов, объединенные в единую группу. Наиболее значимыми по геоэкологическим условиям и связанными с ними техногенными воздействиями на окружающую среду от строительной деятельности являются добыча сырья, изготовление материалов и изделий, этап строительства, эксплуатация, уничтожение или повторное использование.

По мнению С. П. Олейника [18], отходы строительства и сноса относятся к отдельной категории отходов производства и потребления (как правило крупногабаритных), часто требующих их предварительной подготовки к последующему рециклингу. В связи с этим в России строительные отходы обычно направляют на захоронение (размещение) на полигоны твердых коммунальных отходов в качестве изолирующего слоя, что отрицательно влияет на вместимость действующих полигонов и приводит к неоправданным потерям отдельных видов ценных сырьевых ресурсов.

С эколого-экономической точки зрения объект строительства или сноса может рассматриваться не только как источник негативного воздействия на окружающую среду, но и как источник получения дешевого вторичного сырья, материалов для дальнейшего

вовлечения в производственный цикл, а также использоватьсь в качестве потенциально-го донора выработки тепловой энергии в результате сжигания отходов на мусоросжигательных заводах с учетом всех требований экологической и санитарно-гигиенической безопасности.

Опыт зарубежных коллег показывает, что в Соединенных Штатах Америки и Канаде особое внимание уделено перспективности использования переработанных заполнителей из строительных отходов, которые состоят в основном из инертных соединений, но могут содержать опасные материалы – металлы и химические компоненты, которые потенциально способны загрязнять окружающую среду. В исследовании W. Y. Vivian [19] доказано, что замена 50 % добытого первичного заполнителя переработанным заполнителем в проекте дорожного строительства может снизить выбросы парниковых газов от материального компонента дорожно-го строительства примерно на 23 %. С целью сокращения углеродного следа (то есть экономии выбросов углекислого газа) при строительстве дорог и других строительных работах с использованием бетона и асфальтобетона обосновано применение переработанных заполнителей на основе вторичного щебня.

По информации администрации Хабаровска, программой сноса, актуальной для данного города, предусмотрена ликвидация 88 аварийных домов общей площадью 26580,62 м². Ежегодный объем образования строительных отходов в г. Хабаровске, в свою очередь, по оценкам авторов составляет 407,5 тыс. т (326,9 тыс. м³). При этом объем образования крупногабаритных древесных отходов в результате сноса ветхих бараков равен 1,66 тыс. т (996 м³) вторичного пиломатериала. В результате отправки данного объема на полигон при последующем разложении ежегодно выделяется свыше 4,5 тыс. т углекислого газа. Объем образования отходов сноса аварийного жилого фонда на территории Хабаровской агломерации с 2020 по 2030 г. составит свыше 188,3 тыс. т, в том числе вторичных материальных ресурсов – свыше 154,4 тыс. т. Углеродный след в результате раз-



мещения отходов на полигонах твердых коммунальных отходов к 2030 г. составит 116,8 тыс. т углекислого газа. Важно отметить, что все отходы строительного сектора Хабаровской агломерации отправляются на захоронение.

Далее обратимся к геоэкологическим условиям исследуемой территории. Для оценки территории Хабаровской агломерации по рискам размещения строительных отходов составлена гидрогеологическая карта и схема геоэкологического районирования (рисунок).

Нормативные требования к объектам размещения твердых коммунальных отходов определяют геоэкологические аспекты по двум параметрам: расстояние от нижнего уровня отходов до уровня грунтовых вод не менее 2 м и расположение в непросадочных грунтах.

Принцип выделения площадей с неблагоприятными геоэкологическими условиями для размещения полигонов строительных отходов в пределах Хабаровской агломерации заключается в выделении участков, не затапливаемых в периоды катастрофических паводков и характеризующихся залеганием уровней подземных вод на глубине более 2 м. Исходя из этого на территории агломерации выделяются два района: район поймы и надпойменных террас Амура в западной части, затапливаемый в периоды высоких и катастрофических наводнений и характеризующийся неблагоприятными геоэкологическими условиями, а также район правобережья Амура в восточной части площади, где располагается городская застройка и залегание уровней подземных вод превышает 2 м (см. рисунок).

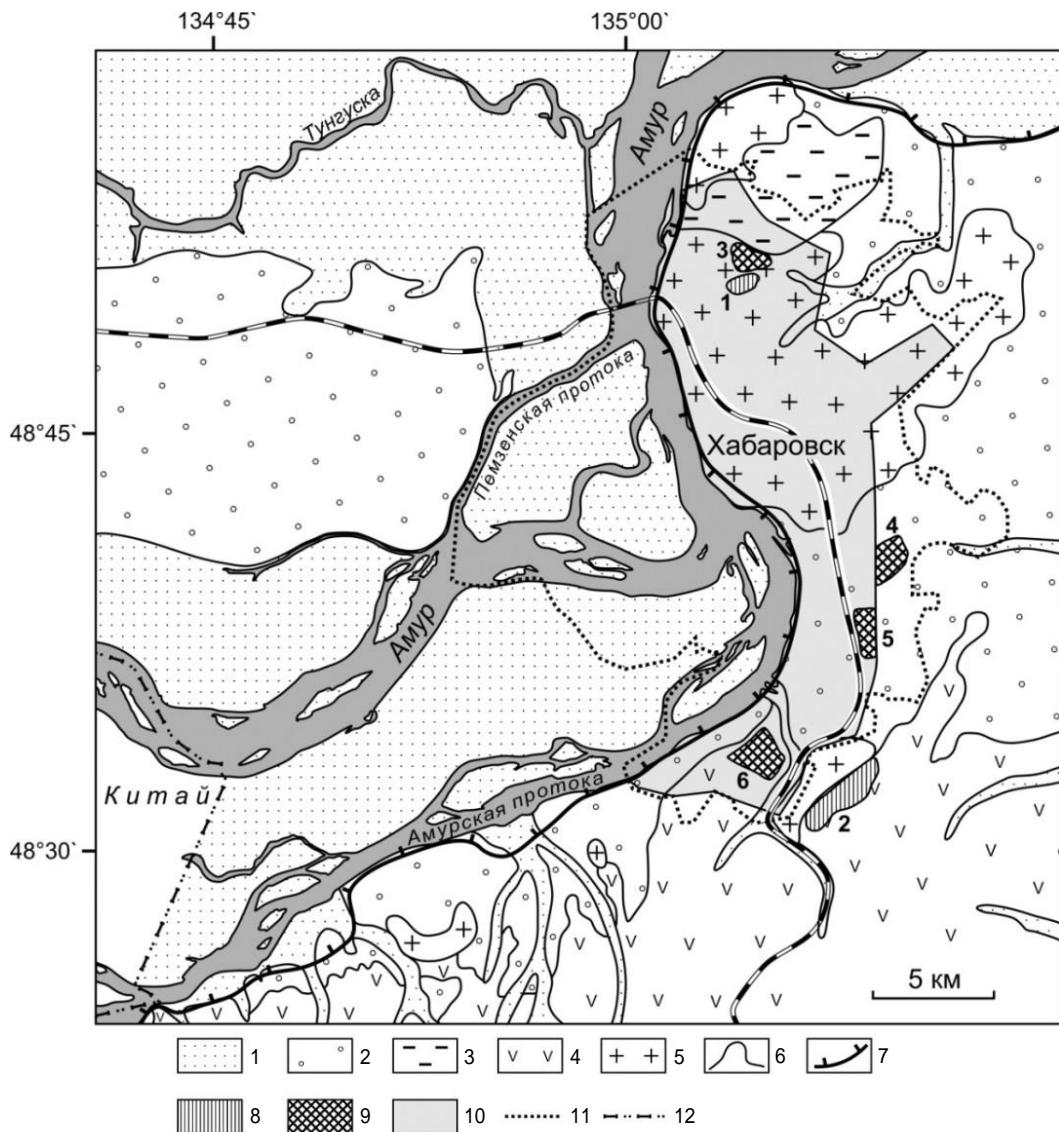
В геологическом строении территории [2] выделены наиболее древние палеозойские породы каменноугольной и пермской систем – метаморфизованные и рассланцованые (глинистые, глинисто-алевритовые, глинисто-кремнистые, кремнисто-хлоритовые, хлоритоглинистые, филлитовидные и другие сланцы, а также спилиты, диабазовые порфиры, их туфо- и лавобрекчии). Мезозойский комплекс пород представлен скальными осадочными (аргиллит, алевролит, песчаник), кремнисты-

ми и кремнисто-глинистыми сланцами, вулканогенными образованиями (туфы и диабазовые порфиры) и интрузивными породами (кварцевые диориты, гранодиориты, порфировидные граниты и гранит-порфиры). Наибольшее распространение на территории имеют кайнозойские осадочные породы Среднеамурской впадины, представленные угленосными палеогеновыми и неогеновыми уплотненными породами (глины, алевриты, пески), а также четвертичными рыхлыми породами (галечники, пески и илы).

В районе г. Хабаровска установлены две впадины, относящиеся по типу к односторонним грабенам – Базовский и Хабаровский, разделенные Хабаровско-Петропавловским горстом. Глубина Базовского грабена достигает 200 м, Хабаровского – более 1000 м. В краевых частях грабенов у их бортов широко развиты разновозрастные склоновые делювиально-элювиальные образования кор выветривания (глины с дресвой и щебнем).

Геоморфологически вдоль подножья хребта Большой Хехцир на юге территории протягивается почти сплошной полосой шириной 1–4 км слабонаклонная поверхность предгорного шлейфа, сложенная грубым глыбово-обломочным материалом. Более 70 % всей территории агломерации занято Средне-Амурской равниной, представляющей сочетание поверхностей нескольких разновозрастных аккумулятивных речных террас. Поймы изобилуют протоками и старицами.

Гидрогеологические условия Хабаровской агломерации определяются ее расположением в центральной части Среднеамурского артезианского бассейна [6]. Палеозойский фундамент бассейна вскрывается скважинами на глубине 100–200 м. К нижней части разреза чехла артезианского бассейна относятся палеогеновые и неогеновые отложения, представленные песками, пластами бурого угля, глин и слабосцементированных песчаников. Верхняя часть разреза чехла артезианского бассейна сложена плиоцен-голоценовыми рыхлыми образованиями приамурской свиты и плейстоцен-голоценовыми аллювиальными отложениями надпойменных и пойменных террас Амура и Тунгуски (пески,



Гидрогеологическая карта и схема геэкологического районирования территории Хабаровской агломерации:

1 – плеистоцен-голоценовый аллювиальный водоносный горизонт; 2 – плиоцен-голоценовый аллювиальный водоносный горизонт приамурской свиты с покровными водоупорными отложениями; 3 – плиоцен-нижнеплейстоценовые относительно водоупорные отложения; 4 – мезозойская водоносная зона трещиноватости (метаморфизованные осадочные отложения фундамента артезианского бассейна); 5 – палеозойская водоносная зона трещиноватости (метаморфизованные отложения фундамента артезианского бассейна); 6 – границы геологого-гидрогеологических подразделений; 7 – контур площади с неблагоприятными геэкологическими условиями для размещения полигонов строительных отходов; 8 – законсервированные свалки и полигоны твердых коммунальных отходов (1 – свалка на ул. Трехгорная, 2 – полигон твердых коммунальных отходов с. Ильинка); 9 – участки возможного размещения предприятий по переработке строительных отходов; 10 – площадь жилой и промышленной застройки; 11 – граница городского округа «Город Хабаровск»; 12 – государственная граница Российской Федерации и Китайской Народной Республики

Hydrogeological map and a diagram of geoenvironmental zoning of the Khabarovsk agglomeration:

1 – Pleistocene-Holocene alluvial aquifer; 2 – Pliocene-Holocene alluvial aquifer of the Amur suite with overlying unpermeable deposits; 3 – Pliocene-Lower Pleistocene relatively unpermeable deposits; 4 – Mesozoic aquifer of the fracture zone (metamorphosed sedimentary deposits of the artesian basin basement); 5 – Paleozoic aquifer of the fracture zone (metamorphosed basement deposits of the artesian basin); 6 – boundaries of geological and hydrogeological units; 7 – contour of the area with unfavorable geo-ecological conditions for waste landfills construction; 8 – abandoned waste heaps and landfills for municipal solid waste (1 – waste heap on Trekhgornaya Street, 2 – solid municipal waste landfill in the settlement of Ilyinka); 9 – areas of the possible location of construction waste recycling enterprises; 10 – area of residential and industrial buildings; 11 – border of the urban district "the City of Khabarovsk"; 12 – state border of the Russian Federation and the People's Republic of China



галечники, гравийники, супеси, изредка глины). Мощность водоносного горизонта плиоцен-голоценовых отложений приамурской свиты достигает 60 м, данный горизонт является основным источником водоснабжения за счет подземных вод в районе г. Хабаровска. Глубина залегания уровня подземных вод от поверхности земли изменяется от 0,5–2 м в пойме р. Амур до 5–15 м на водоразделах.

Практически повсеместно водоносные горизонты перекрыты чехлом относительно водоупорных плиоцен-нижнеплейстоценовых отложений мощностью от 7 до 25 м, представленных глинами и суглинками. По окраинам впадины и над выступами фундамента развиты глины и дресвянистые глины со щебнем.

Режим подземных вод первых от поверхности водоносных горизонтов изучался в районе г. Хабаровска на протяжении более 75 лет [7, 20, 21]. Для внутригодового хода уровней подземных вод голоценовых отложений характерно наличие одного минимума (зимне-весеннего) и нескольких летне-весенних максимумов. На водоразделе Хабаровской равнины (Хабаровский артезианский бассейн второго порядка) минимумы уровней наблюдаются в июне-июле, а максимумы – в декабре-январе. Амплитуда колебания уровня грунтовых вод в годовом цикле варьирует от 0,02 до 5–6 м и зависит от расстояния от реки.

На представленном выше рисунке отмечены участки размещения законсервированных свалок и полигонов твердых коммунальных отходов, а также участки, благоприятные для размещения предприятий по переработке строительных отходов, расположенные

вне зон городской застройки и особо охраняемых природных территорий [22].

Заключение

Для сокращения негативного влияния на окружающую среду размещение отходов строительства и жилищно-коммунального хозяйства на полигонах не предусматривается. На территории Хабаровской агломерации рекомендовано создание комплекса по переработке строительных и крупногабаритных отходов, выполнено обоснование создания данного комплекса, приветствуется также организация экологически ориентированной системы управления. Технологический процесс переработки крупнотоннажных отходов в природно-климатических условиях Хабаровской агломерации должен сопровождаться обустройством зоны для накопления отходов в зимний период, представляющей специально оборудованную площадку для временного размещения строительных отходов.

В ходе представленного исследования авторами выполнено геоэкологическое районирование Хабаровской городской агломерации и проведена оценка экологической нагрузки на территорию с обоснованием создания предприятия по переработке строительных отходов на период до 2030 г.

В целях максимально рационального использования отходов сноса и сохранения природных ресурсов необходима дальнейшая разработка научно-методических основ применения экологически ориентированных технологий, обеспечивающих снижение воздействия на геоэкологическую среду и уменьшение углеродного следа (экономию выбросов углекислого газа).

Список источников

1. Pasichnikov V. E. Environmental aspects of the implementation of the national project "Housing and urban environment" (chapter 4) // Heritage of European science: medicine, chemistry, biology, ecology, agriculture. Monographic series "European Science". Book 2. Part 4. Karlsruhe: Scientific World – NetAkhatAV, 2020. P. 94–105.
2. Варнавский В. Г., Даммер А. Э., Тюрин И. М., Поздняков И. И., Подгорная Т. И., Степанов Н. М. Геологическое строение и инженерно-геологические условия Хабаровска и его окрестностей. Хабаровск: Изд-во ИТИГ ДВО АН СССР, 1991. 113 с.
3. Махинов А. Н., Караванов К. П., Болдовский
4. Ким В. И., Махинов А. Н. Гидрологический режим р. Амур в пределах Хабаровского водного узла // Фундаментальные проблемы изучения и использования воды и водных ресурсов: материалы науч. конф. (г. Иркутск, 20–24 сентября 2005 г.). Иркутск: Изд-во ИГ СО РАН, 2005. Р. 92–94.
5. Махинов А. Н., Ким В. И., Воронов Б. А. Наводнение в бассейне Амура 2013 года: причины и послед-



ствия // Вестник Дальневосточного отделения Российской академии наук. 2014. № 2. С. 5–14.

6. Аверьянова Л. П., Горейко Д. Л., Кулаков В. В. Подземные воды района Хабаровска и их загрязнение // Вопросы географии Дальнего Востока. Вып. 21. Хабаровск: как он есть сегодня (экологическое состояние): сб. статей. Хабаровск: Изд-во ИВЭП ДВО РАН, 1998. С. 115–118.

7. Кулаков В. В., Штенгелев Р. С., Матвеенко Д. В. Взаимодействие подземных и поверхностных вод в зоне Хабаровского водного узла // Науки о земле и недропользование. 2021. Т. 44. № 2. С. 151–158. <https://doi.org/10.21285/2686-9993-2021-44-2-151-158>.

8. Цховребов Э. С. Моделирование экологического баланса объекта строительства и сноса зданий // Строительство: наука и образование. 2017. Т. 7. № 3. С. 69–78. [Электронный ресурс]. URL: http://www.nso-journal.ru/public/journals/1/issues/2017/03/06_03_2017.pdf (15.06.2022).

9. Алехин Ю. А., Люсов А. Н. Экономическая эффективность использования вторичных ресурсов в производстве строительных материалов. М.: Стройиздат, 1988. 344 с.

10. Соломин И. А. Снижение техногенной нагрузки на компоненты природной среды в строительной отрасли // Природобустроство. 2018. № 4. С. 53–59. <https://doi.org/10.26897/1997-6011/2018-4-53-59>.

11. Solís-Guzmán J., Marrero M., Montes-Delgado M. V., Ramírez-de-Arellano A. A Spanish model for quantification and management of construction waste // Waste Management. 2009. Vol. 29. Iss. 9. P. 2542–2548. <https://doi.org/10.1016/j.wasman.2009.05.009>.

12. Chen J., Su Y., Si H., Chen J. Managerial areas of construction and demolition waste: a scientometric review // International Journal of Environmental Research and Public Health. 2018. Vol. 15. Iss. 11. P. 2350. <https://doi.org/10.3390/ijerph15112350>.

13. Hoang N. H., Ishigaki T., Kubota R., Tong T. K., Nguyen T. T., Nguyen H. G., et al. Waste generation, composition, and handling in building-related construction and demolition in Hanoi, Vietnam // Waste Management. 2020. Vol. 117. P. 32–41. <https://doi.org/10.1016/j.wasman.2020.08.006>.

14. Ratnasabapathy S., Alashwal A., Perera S. Investigation of waste diversion rates in the construction and demolition sector in Australia // Built Environment Project and Asset Management. 2021. Vol. 11. Iss. 3. P. 427–439. <https://doi.org/10.1108/BEPAM-01-2020-0012>.

15. Yeheyis M., Hewage K., Alam M. S., Eskicioglu C., Sadiq R. An overview of construction and demolition waste management in Canada: a lifecycle analysis approach to sustainability // Clean Technologies and Environmental Policy. 2013. Vol. 15. P. 81–91. <https://doi.org/10.1007/s10098-012-0481-6>.

16. Пасичников В. Э., Каплунова Н. А. Исследование морфологического состава отходов текущего ремонта квартир (на примере замены заполнений оконных проемов) // Дальневосточная весна – 2021: материалы XIX Междунар. науч.-практ. конф. по проблемам экологии и безопасности (г. Комсомольск-на-Амуре, 30–31 марта 2021 г.). Комсомольск-на-Амуре: Изд-во КнАГУ, 2021. С. 131–134.

17. Pasichnikov V. E., Mayorova L. P. Environmental aspects of the use of construction materials from thin-sheet galvanized steel in the Far Eastern Federal District // IOP Conference. Series: Earth and Environmental Science. 2021. Vol. 720. P. 012015. <https://doi.org/10.1088/1755-1315/720/1/012015>.

18. Олейник С. П. Объемы и источники образования отходов строительства и сноса // Отходы и ресурсы. 2016. Т. 3. № 1. С. 02RRO116. <https://doi.org/10.15862/02RRO116>.

19. Tam V. W. Y., Soomro M., Evangelista A. C. J. A review of recycled aggregate in concrete applications (2000–2017) // Construction and Building Materials. 2018. Vol. 172. P. 272–292. <https://doi.org/10.1016/j.conbuildmat.2018.03.240>.

20. Кулаков В. В., Андреева Д. В., Матвеенко Д. В. Мониторинг подземных вод района города Хабаровска // Экология и безопасность жизнедеятельности городов: проблемы и решения: материалы XIX Междунар. конф. городов-побратимов «Формирование и управление экологической политикой городов» и VI Всерос. науч.-практ. конф. с междунар. участием (г. Хабаровск, 8–9 октября 2019 г.). Хабаровск: Изд-во ДВГУПС, 2019. С. 120–122.

21. Кулаков В. В., Штенгелев Р. С. Мониторинг уровней подземных вод междуречья Амура и Тунгуски // Вестник Северо-Восточного научного центра Дальневосточного отделения Российской академии наук. 2019. № 3. С. 63–70. <https://doi.org/10.34078/1814-0998-2019-3-63-70>.

22. Морозова Г. Ю., Дебелая И. Д., Дубянская И. Г. Особо охраняемые природные территории города Хабаровска. Хабаровск: Хабаровские вести, 2021. 165 с.

References

- Pasichnikov V. E. Environmental aspects of the implementation of the national project "Housing and urban environment" (chapter 4). In: *Heritage of European science: medicine, chemistry, biology, ecology, agriculture. Monographic series "European Science"*. Book 2. Part 4. Karlsruhe: Scientific World – NetAkhatAV; 2020, p. 94–105.
- Varnavskii V. G., Dammer A. E., Tyurin I. M., Pozdnyakov I. I., Podgornaya T. I., Stepanov N. M. Geological structure and engineering-geological conditions of Khabarovsk and its environs. Khabarovsk: Institute of Tectonics and Geophysics of the Far Eastern Branch of the USSR Academy of Sciences; 1991. 113 p. (In Russ.).
- Makhinov A. N., Karavanov K. P., Boldovskii N. V., Voronov B. A., Mirzekhanova Z. G., Mordovin A. M., et al. Water and environmental problems of the Amur river basin. Vladivostok: Institute of Water and Environmental Problems, Far Eastern Branch of the Russian Academy



of Sciences; 2003. 187 p. (In Russ.).

4. Kim V. I., Makhinov A. N. Hydrological regime of the river Amur within the Khabarovsk water hub. In: *Fundamental'nye problemy izucheniya i ispol'zovaniya vody i vodnykh resursov: materialy nauch. konf.* = *Fundamental problems of studying and using water and water resources: proceedings of the scientific conference*. 20–24 September 2005, Irkutsk. Irkutsk: V. B. Sochava Institute of Geography, Siberian Branch of the Russian Academy of Sciences; 2005, p. 92–94. (In Russ.).

5. Makhinov A. N., Kim V. I., Voronov B. A. Floods in the Amur basin in 2013: causes and consequences. *Vestnik Dal'nevostochnogo otdeleniya Rossiiskoi akademii nauk* = *Vestnik of Far Eastern Branch of Russian Academy of Sciences*. 2014;2:5-14. (In Russ.).

6. Aver'yanova L. P., Goreiko D. L., Kulakov V. V. Underground waters of the Khabarovsk region and their pollution. In: *Voprosy geografii Dal'nego Vostoka. Vyp. 21. Khabarovsk: kak on est' segodnya (ekologicheskoe sostoyanie)* = *Problems of Far East Geography. Issue. 21. Today's Khabarovsk: environmental state*. Khabarovsk: Institute of Water and Environmental Problems, Far Eastern Branch of the Russian Academy of Sciences; 1998, p. 115–118. (In Russ.).

7. Kulakov V. V., Shtengelov R. S., Matveenko D. V. Interaction of ground and surface water in Khabarovsk water node area. *Nauki o Zemle i nedropol'zovanie* = *Earth sciences and subsoil use*. 2021;44(2):151-158. (In Russ.). <https://doi.org/10.21285/2686-9993-2021-44-2-151-158>.

8. Tskhovrebov E. S. Modeling of the ecological balance of construction and demolition facilities. *Stroitel'stvo: nauka i obrazovanie* = *Construction: Science and Education*. 2017;79(3):69-78. Available from: http://www.nso-journal.ru/public/journals/1/issues/2017/03/06_03_2017.pdf [Accessed 15th June 2022]. (In Russ.).

9. Alekhin Yu. A., Lyusov A. N. *Economic efficiency of using secondary resources in building material production*. Moscow: Stroizdat; 1988. 344 p. (In Russ.).

10. Solomin I. A. Reducing technogenic load on natural environment components in construction industry. *Prirodoobustroistvo*. 2018;4:53-59. (In Russ.). <https://doi.org/10.26897/1997-6011/2018-4-53-59>.

11. Solís-Guzmán J., Marrero M., Montes-Delgado M. V., Ramírez-de-Arellano A. A Spanish model for quantification and management of construction waste. *Waste Management*. 2009;29(9):2542-2548. <https://doi.org/10.1016/j.wasman.2009.05.009>.

12. Chen J., Su Y., Si H., Chen J. Managerial areas of construction and demolition waste: a scientometric review. *International Journal of Environmental Research and Public Health*. 2018;15(11):2350. <https://doi.org/10.3390/ijerph15112350>.

13. Hoang N. H., Ishigaki T., Kubota R., Tong T. K., Nguyen T. T., Nguyen H. G., et al. Waste generation, composition, and handling in building-related construction and demolition in Hanoi, Vietnam. *Waste Management*. 2020;117:32-41. <https://doi.org/10.1016/j.wasman.2020.08.006>.

14. Ratnasabapathy S., Alashwal A., Perera S. Inves-

tigation of waste diversion rates in the construction and demolition sector in Australia. *Built Environment Project and Asset Management*. 2021;11(3):427-439. <https://doi.org/10.1108/BEPAM-01-2020-0012>.

15. Yeheyis M., Hewage K., Alam M. S., Eskicioglu C., Sadiq R. An overview of construction and demolition waste management in Canada: a lifecycle analysis approach to sustainability // *Clean Technologies and Environmental Policy*. 2013. Vol. 15. P. 81–91. <https://doi.org/10.1007/s10098-012-0481-6>.

16. Pasichnikov V. E., Kaplunova N. A. Morphological composition analysis of apartment renovation waste (by the example of timber window structure replacing). In: *Dal'nevostochnaya vesna – 2021: materialy XIX Mezhdunar. nauch.-prakt. konf. po problemam ekologii i bezopasnosti – Far East Spring – 2021: materials of the 19th International scientific and practical conference on environmental and safety issues*. 30–31 March 2021, Komsomolsk-on-Amur. Komsomolsk-on-Amur: Komsomolsk-na-Amure State University; 2021, p. 131–134. (In Russ.).

17. Pasichnikov V. E., Mayorova L. P. Environmental aspects of the use of construction materials from thin-sheet galvanized steel in the Far Eastern Federal District. *IOP Conference. Series: Earth and Environmental Science*. 2021;720:012015. <https://doi.org/10.1088/1755-1315/720/1/012015>.

18. Oleynik S. P. Amounts and sources of construction and demolition waste. *Otkhody i resursy* = *Russian journal of resources, conservation and recycling*. 2016;3(1):02RRO116. (In Russ.). <https://doi.org/10.15862/02RRO116>.

19. Tam V. W. Y., Soomro M., Evangelista A. C. J. A review of recycled aggregate in concrete applications (2000–2017). *Construction and Building Materials*. 2018;172:272-292. <https://doi.org/10.1016/j.conbuildmat.2018.03.240>.

20. Kulakov V. V., Andreeva D. V., Matveenko D. V. Groundwater monitoring of the area of the city of Khabarovsk. In: *Ekologiya i bezopasnost' zhiznedeyatel'nosti gorodov: problemy i resheniya: materialy XIX Mezhdunar. konf. gorodov-pobratimov "Formirovanie i upravlenie ekologicheskoi politikoi gorodov" i VI Vseros. nauch.-prakt. konf. s mezhdunar. uchastiem* = *Environmental and life safety of cities: problems and solutions: proceedings of the 19th International conference of the twin cities "Formation and management of the urban environmental policy" and the 6th All-Russian scientific and practical conference with international participation*. 8–9 October 2019, Khabarovsk. Khabarovsk: Far Eastern State Transport University; 2019, p. 120–122. (In Russ.).

21. Kulakov V. V., Shtengelov R. S. Monitoring of groundwater levels in the Amur-Tunguska interfluve. *Vestnik Severo-Vostochnogo nauchnogo tsentra Dal'nevostochnogo otdeleniya Rossiiskoi akademii nauk* = *Bulletin of the North-East Scientific Center, Russia Academy of Sciences Far East Branch*. 2019;3:63-70. (In Russ.). <https://doi.org/10.34078/1814-0998-2019-3-63-70>.

22. Morozova G. Yu., Debelya I. D., Dubyanskaya I. G. *Protected areas of Khabarovsk city*. Khabarovsk: Khabarovskie vesti; 2021. 165 p. (In Russ.).



Информация об авторах / Information about the authors



Кулаков Валерий Викторович,
доктор геолого-минералогических наук,
главный научный сотрудник Лаборатории гидрологии и гидрогеологии,
Институт водных и экологических проблем ДВО РАН,
г. Хабаровск, Россия,
vvkulakov@mail.ru,
<https://orcid.org/0000-0003-1313-1598>.

Valeriy V. Kulakov,
Dr. Sci. (Geol. & Mineral.),
Chief Researcher of the Laboratory of Hydrology and Hydrogeology,
Institute of Water and Environmental Problems,
Far Eastern Branch of the Russian Academy of Sciences,
Khabarovsk, Russia,
vvkulakov@mail.ru,
<https://orcid.org/0000-0003-1313-1598>.



Пасичников Вадим Эдуардович,
младший научный сотрудник Лаборатории гидрологии и гидрогеологии,
Институт водных и экологических проблем ДВО РАН,
г. Хабаровск, Россия,
pasichnikovvdm@gmail.com.

Vadim E. Pasichnikov,
Junior Researcher of the Laboratory of Hydrology and Hydrogeology,
Institute of Water and Environmental Problems,
Far Eastern Branch of the Russian Academy of Sciences,
Khabarovsk, Russia,
pasichnikovvdm@gmail.com.

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 24.06.2022; одобрена после рецензирования 27.07.2022; принятая к публикации 30.08.2022.

The article was submitted 24.06.2022; approved after reviewing 27.07.2022; accepted for publication 30.08.2022.



РАЗВЕДКА И РАЗРАБОТКА МЕСТОРОЖДЕНИЙ ПОЛЕЗНЫХ ИСКОПАЕМЫХ

Научная статья

УДК 622.243.24

<https://doi.org/10.21285/2686-9993-2022-45-3-285-293>



Показатели эффективности удаления шлама при бурении наклонно направленных скважин

Анатолий Иванович Ламбина^a

^aИркутский национальный исследовательский технический университет, г. Иркутск, Россия

Резюме. Очистка ствола по-прежнему является серьезной проблемой для большинства наклонно направленных скважин, несмотря на значительный прогресс, достигнутый в области буровых растворов, инструментов и полевой практики, а также развитие университетских и отраслевых исследований. Недостаточная очистка скважины вызывает нежелательные явления, проявляющиеся в виде различного рода осложнений. В связи с этим целью проведенного исследования являлось представление основных корреляций, определяющих характер и степень очистки кольцевого эксцентричного пространства скважины, а также анализ этих корреляций, представленных в виде показателей, с целью их улучшения. Объектом исследования в данном случае стала механика удаления шлама из наклонной или горизонтальной скважины. Механика в исследованиях математически отображается в виде показателей, фиксирующих ту или иную физическую сущность процесса удаления шлама. Методика исследования заключалась в анализе состава показателей, оценке значимости составляющих элементов показателя, выявлении количественного вклада показателя в степень очистки кольцевого пространства наклонно направленной скважины от продуктов разрушения в процессе углубления ее забоя. В результате исследования автором представлены такие показатели, как эквивалентная плотность циркуляции, скорость скольжения и индекс выноса шлама, проиллюстрирована физическая сущность показателей в их математической форме. Большое внимание уделено скорости скольжения. Определение данной скорости, устоявшееся среди специалистов, указывает на скорость омывания буровым раствором частиц шлама в процессе его транспортирования на дневную поверхность. Этот показатель является одним из основных элементов, определяющих гидродинамику процесса транспорта шлама. С целью упрощения его вычисления предложено использование безразмерного критерия Ляшенко.

Ключевые слова: скважина, буровой раствор, скорость, гидравлическое сопротивление, частицы шлама

Для цитирования: Ламбин А. И. Показатели эффективности удаления шлама при бурении наклонно направленных скважин // Науки о Земле и недропользование. 2022. Т. 45. № 3. С. 285–293. <https://doi.org/10.21285/2686-9993-2022-45-3-285-293>.

EXPLORATION AND DEVELOPMENT OF MINERAL DEPOSITS

Original article

Indicators of cutting removal efficiency when drilling directional wells

Anatoly I. Lambin^a

^aIrkutsk National Research Technical University, Irkutsk, Russia

Abstract. Borehole cleaning is still a major challenge for most directional wells despite a significant progress achieved in drilling fluids, tools and field practice, as well as in the development of academic and industry research. Insufficient cleaning of the borehole causes undesirable phenomena in the form of various complications. Therefore, the purpose of the conducted research was to present the main correlations that determine the nature and cleaning degree of the annular eccentric space of the well and to analyze these correlations presented in the form of indicators in order to improve them. The object of the research is the mechanics of cuttings removal from an inclined or horizontal well. In the frameworks of this research mechanics is mathematically displayed in the form of indicators reflecting one or another physical aspect of the



cuttings removal process. The research methodology consists in the analysis of the composition of indicators, evaluation of the significance of the indicator constituents, identification of the quantitative contribution of the indicator to the cleaning degree of the annular space of the directional well from destruction products while sinking the borehole. The study resulted in the introduction of the following indicators: equivalent circulation density, slip velocity and cuttings removal index. The physical essence of indicators in their mathematical form is shown with the focus on the slip velocity. The definition of the latter, which is widely accepted among the specialists indicates the rate of washing of cutting particles by the drilling fluid during its transportation to the day-light surface. This indicator is one of the main ones that determine the hydrodynamics of the cuttings transport process. To simplify the calculation of the indicator, it is proposed to use the dimensionless Lyashchenko criterion.

Keywords: well, drilling fluid, velocity, hydraulic resistance, particles of cuttings

For citation: Lambin A. I. Indicators of cutting removal efficiency when drilling directional wells. *Nauki o Zemle i nedropol'zovanie = Earth sciences and subsoil use*. 2022;45(3):285-293. (In Russ.). <https://doi.org/10.21285/2686-9993-2022-45-3-285-293>.

Введение

Удаление продуктов разрушения при бурении наклонно направленных скважин с горизонтальным окончанием производится потоком бурового раствора и отличается своими особенностями по сравнению с бурением вертикальных скважин. Если при промывке вертикальных скважин частицы шлама распределены достаточно равномерно в поперечном сечении потока и направление силы тяжести их прямо противоположно потоку жидкости, то механизм удаления шлама в наклонных или горизонтальных скважинах иной. Направление действия силы тяжести перпендикулярно потоку жидкости, и протяженность этого действия несравненно с протяженностью в вертикальной скважине (если ориентироваться на площади горизонтального сечения скважин). Отсюда неравномерность содержания шлама в сильно наклонном или горизонтальном потоке по сравнению с вертикальным.

В связи с вышеизложенным цель данного исследования заключалась в том, чтобы представить основные корреляции, разработанные многочисленными исследователями на основе физических законов, экспериментальных подходов, математического моделирования с численными решениями его результатов, которые определяют характер и степень очистки скважины при бурении наклонно направленных скважин с горизонтальным окончанием, и показать существующие параметры, используемые для оптимизации процесса очистки скважины.

Ключевой функцией любого бурового раствора является очистка ствола скважины за счет непрерывной транспортировки шлама из-под долота на поверхность. Определяю-

щими факторами транспортировки шлама, в свою очередь, являются сам буровой раствор и скорость шлама, зависящая от скорости бурового раствора. Скорость раствора зависит от реологических параметров жидкости, ее плотности, производительности насоса и геометрии кольцевого пространства скважины [1]. Скорость потока раствора представляется определяющим фактором в очистке ствола скважины. Можно было бы создать такую скорость, при которой удалялся бы весь шлам, поступающий в скважину, однако в скважине существуют условия, при которых окно между поровым давлением и давлением гидоразрыва стенок ствола может быть узким, что приводит к трещинообразованию и поглощению бурового раствора, также стенки скважины могут подвергаться абразивному размыву. Подобные моменты усложняют мониторинг очистки скважины.

Факторы, влияющие на очистку ствола скважины, разделяют на три группы [2]. Первая группа объединяет параметры жидкости, такие как вязкость жидкости, плотность жидкости и скорость потока жидкости. Вторая группа состоит из параметров шлама, которые включают плотность частиц, размер и их форму, а также концентрацию шлама в затрубном пространстве. Третья группа представляет собой операторные факторы и состоит из характеристик бурильной колонны с устройствами захвата потока жидкости и эксцентричного ее расположения в стволе, а также наклона самого ствола скважины.

На степень очистки наклонно направленных скважин влияют те же факторы, что и в случае вертикальных скважин, но из-за наличия угла наклона ствола скважины на нижней



ее стенке формируются слои шлама, выпавшего в осадок. При промывке в наклонных скважинах основное внимание уделяется удалению из слоев осевшего шлама его частиц и их переводу в суспензию. В зависимости от поведения шлама при циркуляции жидкости в наклонно направленной скважине ее профиль подразделяется на три участка [3]: с углом наклона до 30° (вертикальный), с углом наклона от 30 до 65° (переходный), а также с углом наклона от 65 до 90° (горизонтальный). При бурении вертикального участка проблем с очисткой не возникает. В переходном участке шлам оседает на нижнюю стенку и, накапливаясь, может сдвигаться вниз по стволу в объеме, меньшем, чем объем осевшего шлама в целом. При проходке горизонтального участка слои шлама становятся плотными, в связи с чем их最难 разрушить, используя кинетику потока жидкости.

Общий объем шлама в транспортирующей его жидкости не должен превышать 5 % [4], в противном случае могут возникнуть проблемы со стволами. Некоторые исследователи уменьшают этот предел до 4 %.

Материалы и методы исследования

Транспортирование шлама. Скорость жидкости является критическим параметром, контролирующим способность системы транспортировать частицы разрушенной породы.

Транспортирование шлама на разных участках проходит по-разному из-за различий в природе слоев шлама. Различают два механизма транспортирования шлама: перемещение в движущемся слое и движение в суспензии. На вертикальном участке, как отмечалось выше, шлам в растворе распределен равномерно и его концентрация в жидкости постоянна. С ростом угла наклона крупный шлам оседает на стенку, двигаясь вверх по стволу супензионно с изменяющейся концентрацией. При достижении углов в 55 – 65° сформировавшийся слой может скатываться вниз по стенке обсадной колонны. При углах выше 65° шлам удаляется в виде суспензии с изменяющейся концентрацией, но уже над сформировавшимся слоем шлама на нижней стенке скважины. С дальнейшим увеличением

угла шламовый слой становится устойчивым. Таким образом, удаление шлама в виде суспензии является наиболее эффективным механизмом. Тем не менее для превращения этого слоя в суспензию требуется высокая скорость бурового раствора, которая ограничивается эквивалентной циркуляционной плотностью, восприимчивостью к эрозии открытого участка скважины и недостаточностью гидравлической мощности буровой установки.

При такой обстановке требуется индикация эффективности очистки ствола в реальном времени с целью контроля условий ствола и постоянного его мониторинга, особенно в критических скважинах.

В удалении продуктов разрушения отмечают ключевые факторы, такие как скорость оседания шлама, образование пласта шлама на нижней стенке наклонно направленной скважины и его эрозия [5].

Основные показатели, определяющие эффективность транспорта шлама. Шлам, образующийся в скважине, испытывает нисходящее движение под действием силы тяжести, что приводит к отрицательной скорости относительно скорости жидкости. Скорость обтекания частиц в потоке бурового раствора характеризуется разностью скоростей несущей (непрерывной) и транспортируемой (дискретной) фаз. При расчетах используют среднюю величину этой разницы, называемой скоростью скольжения V_{sl} , которая является ключевым фактором в определении транспорта шлама. Движение шлама вверх по затрубному пространству определяется скоростью, называемой скоростью перемещения шлама, V_t – это разница между скоростью жидкости в кольцевом пространстве V_a и скоростью скольжения шлама V_{sl} [6]:

$$V_t = V_a - V_{sl}. \quad (1)$$

Скорость скольжения может быть определена в зависимости от типа жидкости и режима течения. Что касается ламинарных течений, здесь существуют разные отношения для ньютоновских и неニュтоновских жидкостей в зависимости от их реологических свойств. В турбулентном потоке реологические свойства не влияют на скорость скольжения [7]. В горизонтальном потоке скорость

скольжения инициирует силы, действующие на частицу в направлении, перпендикулярном гидродинамической оси потока. Гидродинамическая подъемная сила действует в направлении, перпендикулярном средней скорости потока, и имеет тенденцию поднимать твердые частицы со стационарного слоя. Эти силы возникают в результате давления и напряжения сдвига, что может быть получено путем интегрирования давления и напряжения сдвига по поверхности частицы.

На основе скорости скольжения формируется такой показатель, как транспортное отношение F_T [8]:

$$F_T = \frac{\bar{v}_T}{\bar{v}_a}. \quad (2)$$

Подставив в данную формулу \bar{v}_T из формулы (1), получим

$$F_T = 1 - \frac{\bar{v}_{sl}}{\bar{v}_a}. \quad (3)$$

Транспортное отношение – это мера того, как шлам оседает или рециркулирует в затрубном пространстве относительно единицы бурового раствора, движущегося вверх по стволу скважины.

Количество шлама в кольцевом пространстве может четко отражать эффективность транспортировки шлама. В исследованиях, осуществляемых с помощью поверхностных гидравлических схем (петель), это количество отображают с помощью таких показателей, как высота шламовой постели h , концентрация шлама C_f , площадь контура поперечного

сечения шламовой постели A_{mb} (рисунок) и соотношение масс взвешенных частиц и начальной массы отложенного шлама RMC [2].

Результирующая концентрация бурового шлама в затрубном пространстве определяется как

$$C_c = \frac{Q_c}{Q_c + Q_m}, \quad (4)$$

где Q_m – объемный расход бурового раствора; Q_c – объемный расход шлама, который зависит от размера долота и скорости бурения [9].

$$Q_c = \frac{\pi(1-\varphi)d^2}{4} ROP. \quad (5)$$

Здесь φ – пористость породы; d – диаметр долота или скважины; ROP – механическая скорость бурения.

Предполагается, что взвешенный шлам равномерно распределяется по площади, открытой для потока. Очевидно, это предположение имеет большое значение, и фактическое распределение, вероятно, является функцией геометрии ствола скважины, свойств бурового раствора, свойств выбуренной породы и операционных условий.

Средняя скорость переноса шлама определена в источнике [10] выражением

$$\bar{v}_c = \frac{Q_c}{A_{an}C_f}, \quad (6)$$

где A_{an} – площадь поперечного сечения кольцевого пространства скважины.

Средняя скорость бурового раствора в затрубном пространстве определяется как функция расхода бурового раствора:

$$\bar{v}_{an} = \frac{Q_m}{A_{an}(1-C_f)}. \quad (7)$$

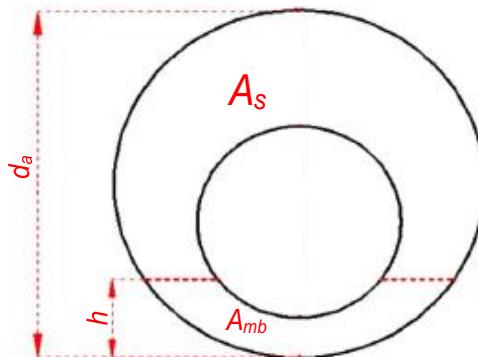


Схема поперечного сечения горизонтальной части скважины:

A_{mb} – площадь сечения пласта шлама, образующегося в процессе углубления ствола скважины;
 A_s – площадь сечения потока бурового раствора, несущего шлам; h – высота шламового слоя (шламовая постель); d_a – диаметр скважины или внутренний диаметр обсадных труб

Diagram of the cross section of the horizontal part of the well:

A_{mb} – cross-sectional area of the cuttings formation resulting from the borehole sinking;
 A_s – cross-sectional area of the drilling fluid flow carrying cuttings; h – height of the cutting bed;
 d_a – borehole diameter or casing inner diameter



При использовании пластических бингамовских жидкостей в скважинах с большим наклоном в источнике [11] C_f определена следующим образом:

$$C_f = 0,01778ROP + 0,505. \quad (8)$$

Выражая C_f в процентах и подставляя в формулу (6), получим

$$\bar{v}_{an} = \frac{100Q_m}{A_{an}(100-C_f)}.$$

Подставив \bar{v}_{an} и C_f , получим

$$\bar{v}_{an} = \frac{127,324Q_m}{(D_{hol}^2 - D_{pipe}^2)(99,5 - 0,01778ROP)},$$

где D_{hol} – диаметр скважины; D_{pipe} – диаметр бурильной колонны.

В источнике [12] величина \bar{v}_{an} выражена в футах через кольцевой зазор ($A_{cl} = D_{hol} - D_{pipe}$):

$$\bar{v}_{an} = \frac{40,8528Q_m}{(99,5 - 0,01778ROP)(2D_{pipe} + A_{cl})A_{cl}}. \quad (9)$$

Данное выражение позволяет регулировать давление в затрубном пространстве путем изменения механической скорости бурения и клиренса эксцентричного пространства скважины.

В зависимости от режима течения и модели вязкости имеют место и другие корреляции скорости движения жидкости в затрубном пространстве [13–15].

Кроме скорости бурового раствора в затрубном пространстве, которую считают одним из оптимизационных параметров очистки скважины, существуют и другие параметры, к примеру плотность бурового раствора и его вязкость. Эти параметры можно регулировать непосредственно на буровой установке. Результаты регулирования оценивают по эмпирической зависимости, называемой индексом выноса шлама CCI [13, 16]:

$$CCI = \frac{K \cdot AV \cdot MW}{400000}, \quad (10)$$

где K – вязкость при низкой скорости сдвига; AV – скорость в кольцевом пространстве скважины; MW – плотность бурового раствора. Величина 400000 является просто нормализующей константой и не является коэффициентом пересчета¹. Назначение этой константы заключается в получении значения CCI , соизмеримого с единицей. Значение $CCI \geq 1$ соот-

ветствует отсутствию проблем с очисткой, значение же < 1 указывает на более высокий риск очистки скважины.

Скорость в кольцевом пространстве определяется по формуле

$$AV = \frac{24,50}{D_h^2 - D_p^2}. \quad (11)$$

Применение CCI дает представление о чистоте рассматриваемой секции скважины, но не о производительности бурения. Использование C_f устанавливает предел максимальной скорости бурения, не вызывая проблем со стволом скважины или скоплением шлама.

При установлении параметров очистки скважины необходимо отслеживать давление в скважине, которое определяется, с одной стороны, гидростатическим давлением P , а с другой –эквивалентной циркуляционной плотностью ECD .

$$P = MV \cdot TVD \cdot 0,052,$$

где TVD – глубина скважины.

ECD же, согласно источнику [17], находится следующим образом:

$$ECD = ESD(1 - C_f) + (\rho_p C_f + \frac{\Delta p}{g \cdot 10^{-3} H})^a, \quad (12)$$

где ESD – эквивалентная статическая плотность; ρ_p – плотность частиц шлама; Δp – потери давления в кольцевом пространстве; H – глубина скважины по вертикали; g – гравитационное ускорение, равное $9,8 \text{ м/с}^2$; a – постоянная с учетом единиц измерения, равная 8,345.

Мониторинг ECD будет определять условия устойчивости ствола, а также крутящий момент, сопротивление и объем шлама. Полученные показатели по результатам скважинного мониторинга, в свою очередь, будут определять, насколько чиста скважина. Основными компонентами, влияющими на ECD , являются шлам в кольцевом пространстве, выраженный как ESD , и параметры, связанные с буровым раствором.

В процессе бурения используют инструменты, содержащие датчики давления, которые могут измерять забойное давление скважины независимо от факторов, контролирующих ECD [18], кажущаяся вязкость бурового раствора уменьшается с увеличением враще-

¹ Rheology and hydraulics of oil-well drilling: API recommended practice 13D [Электронный ресурс]. URL: <https://studylib.net/doc/8889356/rheology-and-hydraulics-of-oil-well-drilling-fluids> (14.02.2022).



ния трубы, следовательно, общие потери на трение также уменьшаются. Инструменты могут дать точные показания для ESD и ECD по общему давлению, действующему на забой скважины во время циркуляции. Сравнение ESD с измеренным забойным давлением дает четкое представление о причинах изменений в ECD [19].

Реологический фактор выноса шлама. Рассмотренные показатели очистки скважины в процессе непосредственного углубления забоя скважины дают общее представление об этапах процесса очистки скважины. Не все модели и корреляции многочисленных исследователей, изучающих механизмы удаления продуктов разрушения, здесь показаны. Сложность воздействия потока бурового раствора на частицы шлама определяется различием типа жидкостей, применяемых в качестве бурового раствора, их режимов течения, различием размеров, формы и веса самих частиц, рассматриваемых моделей состояния системы «жидкость – твердое».

Для увеличения производительности выноса выбуренной породы из кольцевого пространства скважины используют вращение бурильной колонны, которую оснащают иногда специальными элементами, повышающими механическое действие колонны на осевший пласт шлама в части скважины с большим углом наклона. Эффективность выноса шлама повышают посредством введения в буровой раствор «плавучих» частиц в виде бусинок из пластика, то есть частиц, имеющих плотность, меньшую или равную плотности раствора, а также введения волокнистого материала.

Результаты исследования

Несмотря на вышеизложенное, для контроля ECD в любом случае требуется определение сопротивления движению суспензии в кольцевом пространстве скважины, которое зависит от режима течения раствора. Для каждого режима определяется гидравлический коэффициент сопротивления c , который для ламинарного потока равен $24/Re$, для переходного режима – $24/Re^{0,75}$, для турбулент-

ного режима составляет 1,12. В ходе вычисления гидравлического коэффициента сопротивления требуется определение числа Рейнольдса Re , которое, как известно, имеет следующее выражение:

$$Re = \frac{V_s d \rho_f}{\eta}. \quad (13)$$

Здесь V_s – скорость обтекания частицы; d – диаметр частицы; η – динамическая вязкость жидкости; ρ_f – плотность жидкости.

Скорость обтекания частиц в потоке бурового раствора характеризуется разностью скоростей несущей (непрерывной) и транспортируемой (дискретной) фаз. При расчетах используют среднюю величину скорости скольжения, которую выбирают также исходя из режима течения для ламинарного режима по формуле Стокса:

$$V_s = \frac{2 r^2 g (\rho_p - \rho_f)}{9 \eta}, \quad (14)$$

где r – радиус частицы; g – ускорение свободного падения.

Для переходного и турбулентного режимов используют формулу Риттингера:

$$V_s = k \left[g d \left(\frac{\rho_f}{\rho_p} \right) \right]^{1/2}, \quad k = 2(3c)^{-1/2}. \quad (15)$$

Эти две формулы подставляются в формулу (13) числа Re , причем вязкость при ламинарном режиме должна уточняться с учетом формулы Эйнштейна

$$\eta = \eta_{bp}(1 + 2,5 \cdot \varphi), \quad (16)$$

где η_{bp} – вязкость приготовляемого бурового раствора; φ – объемная концентрация твердой фазы (шлама) в буровом растворе.

Для расчета режима обтекания используется полуэмпирическая зависимость с критериями Ar и Re^2 :

$$Re = \frac{u_B d_q}{v} = \frac{Ar}{18 + 0,6Ar^{0,5}}, \quad (17)$$

в которой число Архимеда

$$Ar = \frac{d^3 g (\rho_p - \rho_f)}{v_f^2 \rho_f}.$$

Здесь v_f – скорость сплошной фазы; u_B – скорость обтекания; v – кинематическая вязкость.

$$u_B = 1,71 \left[\frac{d_q g \rho_q}{\rho} \right]^{1/2}.$$

Коэффициент сопротивления среды зависит не только от критерия Рейнольдса, но и от

² Лаптев А. Г., Фарахов М. И. Гидромеханические процессы в нефтехимии и энергетике: пособие к расчету аппаратов. Казань: Изд-во КГУ, 2008. 729 с.



Параметры аппроксимации критерия Лященко [20] Approximation parameters of the Lyashchenko criterion [20]

Диапазон изменения $Re^2\varphi$	Диапазон изменения Re	A	m
$8 \cdot 10^{-3} \dots 3$	$< 10^{-3}$	0,133	1
$3 \dots 1,2 \cdot 10^2$	$10^{-3} \dots 10$	0,1	0,943
$1,2 \cdot 10^2 \dots 3,5 \cdot 10^3$	$10 \dots 10^2$	0,269	0,69
$3,5 \cdot 10^3 \dots 10^5$	$10^2 \dots 8 \cdot 10^2$	1,112	0,575
$10^5 \dots 3 \cdot 10^9$	$8 \cdot 10^2 \dots 1,2 \cdot 10^5$	7,95	0,493

фактора формы Φ , то есть

$$C = f(Re, \Phi).$$

Для определения режима обтекания по формуле (13) существует необходимость применения итерационного подхода, так как неизвестен режим обтекания частицы и невозможно выбрать коэффициент сопротивления среды. Для исключения такой процедуры предлагается использовать критерий Лященко, который не зависит от искомой скорости движения частицы:

$$Re^2\varphi = f(Re).$$

Этот критерий не включает в явном виде коэффициент сопротивления φ , который определяется искомой скоростью. Существует графическая зависимость критерия Рейнольдса от параметра Лященко³. Тем не менее в расчетах на компьютере удобнее пользоваться не диаграммой, а аппроксимацией диаграммы в виде формул:

$$Re = (A Re^2 \varphi)^m$$

при значениях A и m , указанных в таблице. Отсюда формула для расчета скорости скольжения v_{sl} принимает вид

$$v_{sl} = \frac{(A Re^2 \varphi)^m}{d\rho},$$

где A и m – коэффициенты для аппроксимации диаграммы Лященко.

Заключение

Описанные выше показатели очистки скважины позволяют оценить состояние удаляемого из скважины шлама с учетом пространственного положения скважины, характерных свойств самого шлама, свойств и реологического поведения промывочной жидкости. Эти и подобные им показатели учитываются при составлении гидравлической программы промывки скважины, позволяют оптимизировать процесс удаления шлама. Применение безразмерных критериев в расчетах динамики дисперсной фазы в буровых растворах упрощает эти расчеты. Среди показателей мало таких, которые бы достаточно полно представляли теоретические вопросы процессов транспорта шлама. В связи с этим следует отметить такой показатель, как скорость скольжения, который определяет гидродинамику процесса транспорта шлама. Нами предлагается использовать безразмерный критерий Лященко для упрощения расчетов, связанных с определением скорости скольжения.

Список источников

1. Belavadi M. N., Chukwu G. A. Experimental study of the parameters affecting cutting transportation in a vertical wellbore annulus // SPE Western Regional Meeting. Long Beach, 1994. P. SPE-27880-MS.
2. Wang K., Yan T., Sun X., Shao S., Luan S. Review and analysis of cuttings transport in complex structural wells // The Open Fuels & Energy Science Journal. 2013. Vol. 6. P. 9–17. <https://doi.org/10.2174/1876973X20130610001>.
3. Cho H., Shah S. N., Osisanya S. O. A three-segment hydraulic model for cuttings transport in coiled tubing horizontal and deviated drilling // Journal of Canadian Petroleum Technology. 2002. Vol. 41. Iss. 6. P. PETSOC-02-06-03. <https://doi.org/10.2118/02-06-03>.
4. Pigot R. J. S. Mud flow in drilling // Drilling and Production Practice. 1941. P. 91–103.
5. Pedrosa C., Saasen A., Ytrehus J. D. Fundamentals and physical principles for drilled cuttings transport-cuttings bed sedimentation and erosion // Energies. 2021. Vol. 14. Iss. 3. P. 545. <https://doi.org/10.3390/en14030545>.
6. Rehm B., Haghshenas A., Paknejad A. S., Al-Yami A., Hughes J. Underbalanced drilling: limits and extremes. Houston: Gulf Publishing Company, 2013. 629 p.
7. Caenn R., Darley H. C. H., Gray G. R. Composition

³ Лаптев А. Г., Фарахов М. И. Гидромеханические процессы в нефтехимии и энергетике: пособие к расчету аппаратов. Казань: Изд-во КГУ, 2008. 729 с.



and properties of drilling and completion fluids. Houston: Gulf Professional Publishing, 2011. 720 p.

8. Adari R. B., Miska S., Kuru E., Bern P., Saasen A. Selecting drilling fluid properties and flow rates for effective hole cleaning in high-angle and horizontal wells // SPE Annual Technical Conference and Exhibition. Texas, 2000. P. SPE-63050-MS.

9. Bourgoyne Jr. A. T., Millheim K. K., Chevenert M. E., Young Jr. F. S. Applied drilling engineering. Richardson: Society of Petroleum Engineers, 1991. 502 p.

10. Alawami M., Bassam M., Gharbi S., Al Rubaii M. A real-time indicator for the evaluation of hole cleaning efficiency // SPE/IATMI Asia Pacific Oil & Gas Conference and Exhibition. Bali, 2019. P. SPE-196448-MS. <https://doi.org/10.2118/196448-MS>.

11. Larsen T. I., Pilehvari A. A., Azar J. J. development of a new cuttings-transport model for high-angle wellbores including horizontal wells // SPE Drilling & Completion. 1997. Vol. 12. Iss. 2. P. 129–135. <https://doi.org/10.2118/25872-PA>.

12. Ofesi S. F., Onwukwe S. I., Duru U. I. Optimizing hole cleaning using low viscosity drilling fluid // Advances in Petroleum Exploration and Development. 2017. Vol. 14. Iss. 1. P. 55–61. <https://doi.org/10.3968/9658>.

13. Hopkins C. J., Leicksenring R. A. Reducing the risk of stuck pipe in the Netherlands // SPE/IADC Drilling Conference. Amsterdam, 1995. P. SPE-29422-MS. <https://doi.org/10.2118/29422-MS>.

14. Abimbola M. O., Chukwu G. A., Khan F. I. Cuttings transport evaluation in deviated wells // The International

Conference on Marine and Freshwater Environments. 2014. <https://doi.org/10.13140/2.1.2562.5601>.

15. Chien S.-F. Annylar velocity for rotary drilling operations // International Journal of Rock Mechanics and Mining Sciences & Geomechanics Abstracts. 1972. Vol. 9. Iss. 3. P. 403–416. [https://doi.org/10.1016/0148-9062\(72\)90005-8](https://doi.org/10.1016/0148-9062(72)90005-8).

16. Okon A. N., Agwu O. E., Udoh F. D. Evaluation of the cuttings carrying capacity of a formulated synthetic-based drilling mud // SPE Nigeria Annual International Conference and Exhibition. Lagos, 2015. P. SPE-178263-MS. <https://doi.org/10.2118/178263-MS>.

17. Bybee K. Equivalent-circulating-density fluctuation in extended-reach drilling // Journal of Petroleum Technology. 2009. Vol. 61. Iss. 2. P. 64–67. <https://doi.org/10.2118/0209-0064-JPT>.

18. Dokhani V., Ma Y., Yu M. Determination of equivalent circulating density of drilling fluids in deepwater drilling // Journal of Natural Gas Science and Engineering. 2016. Vol. 34. P. 1096–1105. <https://doi.org/10.1016/j.jngse.2016.08.009>.

19. Lin T., Wei C., Zhang Q., Sun T. Calculation of equivalent circulating density and solids concentration in the annular space when reaming the hole in deepwater drilling // Chemistry and Technology of Fuels and Oils. 2016. Vol. 52. P. 70–75. <https://doi.org/10.1007/s10553-016-0674-5>.

20. Кизевальтер Б. В. Теоретические основы гравитационных процессов обогащения. М.: Недра, 1979. 295 с.

References

1. Belavadi M. N., Chukwu G. A. Experimental study of the parameters affecting cutting transportation in a vertical wellbore annulus. *SPE Western Regional Meeting*. Long Beach; 1994, p. SPE-27880-MS.
2. Wang K., Yan T., Sun X., Shao S., Luan S. Review and analysis of cuttings transport in complex structural wells. *The Open Fuels & Energy Science Journal*. 2013;6: 9-17. <https://doi.org/10.2174/1876973X20130610001>.
3. Cho H., Shah S. N., Osisanya S. O. A three-segment hydraulic model for cuttings transport in coiled tubing horizontal and deviated drilling. *Journal of Canadian Petroleum Technology*. 2002;41(6):PETSOC-02-06-03. <https://doi.org/10.2118/02-06-03>.
4. Pigot R. J. S. Mud flow in drilling. *Drilling and Production Practice*. 1941:91-103.
5. Pedrosa C., Saasen A., Ytrehus J. D. Fundamentals and physical principles for drilled cuttings transport-cuttings bed sedimentation and erosion. *Energies*. 2021;14(3):545. <https://doi.org/10.3390/en14030545>.
6. Rehm B., Haghshenas A., Paknejad A. S., Al-Yami A., Hughes J. *Underbalanced drilling: limits and extremes*. Houston: Gulf Publishing Company; 2013. 629 p.
7. Caenn R., Darley H. C. H., Gray G. R. *Composition and properties of drilling and completion fluids*. Houston: Gulf Professional Publishing; 2011. 720 p.
8. Adari R. B., Miska S., Kuru E., Bern P., Saasen A. Selecting drilling fluid properties and flow rates for effective hole cleaning in high-angle and horizontal wells. *SPE Annual Technical Conference and Exhibition*. Texas; 2000, p. SPE-63050-MS.
9. Bourgoyne Jr. A. T., Millheim K. K., Chevenert M. E., Young Jr. F. S. *Applied drilling engineering*. Richardson: Society of Petroleum Engineers; 1991. 502 p.
10. Alawami M., Bassam M., Gharbi S., Al Rubaii M. A real-time indicator for the evaluation of hole cleaning efficiency. *SPE/IATMI Asia Pacific Oil & Gas Conference and Exhibition*. Bali; 2019, p. SPE-196448-MS. <https://doi.org/10.2118/196448-MS>.
11. Larsen T. I., Pilehvari A. A., Azar J. J. development of a new cuttings-transport model for high-angle wellbores including horizontal wells. *SPE Drilling & Completion*. 1997;12(2):129-135. <https://doi.org/10.2118/25872-PA>.
12. Ofesi S. F., Onwukwe S. I., Duru U. I. Optimizing hole cleaning using low viscosity drilling fluid. *Advances in Petroleum Exploration and Development*. 2017;14(1):55-61. <https://doi.org/10.3968/9658>.
13. Hopkins C. J., Leicksenring R. A. Reducing the risk of stuck pipe in the Netherlands. *SPE/IADC Drilling Conference*. Amsterdam; 1995, p. SPE-29422-MS. <https://doi.org/10.2118/29422-MS>.
14. Abimbola M. O., Chukwu G. A., Khan F. I. Cuttings transport evaluation in deviated wells. *The International Conference on Marine and Freshwater Environments*. 2014. <https://doi.org/10.13140/2.1.2562.5601>.



15. Chien S.-F. Annular velocity for rotary drilling operations. *International Journal of Rock Mechanics and Mining Sciences & Geomechanics Abstracts*. 1972;9(3):403-416. [https://doi.org/10.1016/0148-9062\(72\)90005-8](https://doi.org/10.1016/0148-9062(72)90005-8).
16. Okon A. N., Agwu O. E., Udoth F. D. Evaluation of the cuttings carrying capacity of a formulated synthetic-based drilling mud. *SPE Nigeria Annual International Conference and Exhibition*. Lagos; 2015, p. SPE-178263-MS. <https://doi.org/10.2118/178263-MS>.
17. Bybee K. Equivalent-circulating-density fluctuation in extended-reach drilling. *Journal of Petroleum Technology*. 2009;61(2): 64-67. <https://doi.org/10.2118/0209-0064-JPT>.
18. Dokhani V., Ma Y., Yu M. Determination of equivalent circulating density of drilling fluids in deepwater drilling. *Journal of Natural Gas Science and Engineering*. 2016;34: 1096-1105. <https://doi.org/10.1016/j.jngse.2016.08.009>.
19. Lin T., Wei C., Zhang Q., Sun T. Calculation of equivalent circulating density and solids concentration in the annular space when reaming the hole in deepwater drilling. *Chemistry and Technology of Fuels and Oils*. 2016;52:70-75. <https://doi.org/10.1007/s10553-016-0674-5>.
20. Kizeval'ter B. V. *Theoretical foundations of gravity concentration processes*. Moscow: Nedra; 1979. 295 p. (In Russ.).

Информация об авторе / Information about the author



Ламбин Анатолий Иванович,
кандидат технических наук,
доцент кафедры нефтегазового дела,
Институт недропользования,
Иркутский национальный исследовательский технический университет,
г. Иркутск, Россия,
alambin@ex.istu.edu.
Anatoly I. Lambin,
Cand. Sci. (Eng.),
Associate Professor of the Oil and Gas Department,
Institute of Subsoil Use,
Irkutsk National Research Technical University,
Irkutsk, Russia,
alambin@ex.istu.edu.

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

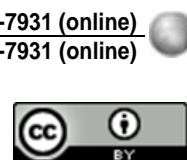
Автор заявляет об отсутствии конфликта интересов.
The author declares no conflicts of interests.

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 17.02.2022; одобрена после рецензирования 26.07.2022; принятая к публикации 30.08.2022.

The article was submitted 17.02.2022; approved after reviewing 26.07.2022; accepted for publication 30.08.2022.

**Научная статья****УДК 622.271.1:622.236.52****<https://doi.org/10.21285/2686-9993-2022-45-3-294-304>**

Влияние гидродинамических эффектов на структурные изменения дисперсоида в процессе микродезинтеграции

Наталья Петровна Хрунина^a^aИнститут горного дела ДВО РАН – обособленное подразделение Хабаровского Федерального исследовательского центра ДВО РАН, г. Хабаровск, Россия

Резюме. Цель представленного исследования заключалась в теоретическом обосновании процесса образования дисперсоида высокоглинистых песков россыпей с повышенным содержанием мелкого и тонкодисперсного золота в условиях изменения гидродинамических параметров потока гидросмеси посредством ограждающих и отражающих поверхностей предлагаемой установки. Объектом исследований являлся процесс гидродинамической дезинтеграции. Предмет исследования включал основные параметры гидродинамического воздействия на минеральную среду и характер разрушения высокоглинистых песков в гидродинамических условиях. В ходе работы автором были использованы методы построения математической модели преобразования дисперсоида при гидродинамическом воздействии на гидросмесь, аналитические и численные расчеты. Анализ аспектов гидродинамических явлений и взаимодействий позволил обосновать процесс образования дисперсоида на основе интенсификации микродезинтеграции и выявить характерные факторы влияния. На основе теории изменения термодинамического потенциала системы поверхностей частиц при динамическом воздействии предложен метод определения гидродинамических параметров изменения структурной составляющей гидросмеси в закрытой полости генератора при взаимодействии с элементами ограждающих и отражающих поверхностей. На основе численных расчетов установлено существенное увеличение удельной межфазной поверхности дисперсоида минеральной составляющей. В результате взаимодействия с элементами ограждающих и отражающих поверхностей в предлагаемой инновационной схеме расположения элементов в генераторе при направленной подаче гидросмеси из сопла в закрытую полость увеличение составило от 3 до 4 раз. Предложена новая конструкция гидродинамического генератора и технологическая схема для обеспечения активизации процесса извлечения микрочастиц ценных компонентов.

Ключевые слова: высокоглинистые пески, гидродинамические явления, микродезинтеграция, термодинамический потенциал, гидродинамический генератор, кавитационный реактор

Финансирование: Исследования проводились с использованием ресурсов Центра коллективного пользования научным оборудованием «Центр обработки и хранения научных данных Дальневосточного отделения Российской академии наук», финансируемого Российской Федерацией в лице Министерства науки и высшего образования Российской Федерации по проекту № 075-15-2021-663.

Для цитирования: Хрунина Н. П. Влияние гидродинамических эффектов на структурные изменения дисперсоида в процессе микродезинтеграции // Науки о Земле и недропользование. 2022. Т. 45. № 3. С. 294–304. <https://doi.org/10.21285/2686-9993-2022-45-3-294-304>.

Original article

Influence of hydrodynamic effects on dispersoid structural changes under microdisintegration

Natalia P. Khrunina^a^aMining Institute, Far Eastern Branch of the Russian Academy of Sciences – an autonomous subdivision of the Khabarovsk Federal Research Center of the Far Eastern Branch of the Russian Academy of Sciences, Khabarovsk, Russia

Abstract. The purpose of the presented study is to give a theoretical substantiation of the formation process of a high-clay sand dispersoid from placers with a high content of fine and finely dispersed gold under changing hydrodynamic parameters of the hydro mixture flow by means of enclosing and reflecting surfaces of the proposed installation. The object of the research is the process of hydrodynamic disintegration. The subject of the study includes the main parameters of the hydrodynamic effect on the mineral environment and the destruction nature of high-clay sands under hydrodynamic



conditions. While doing the research, the author used the methods for constructing a mathematical model of dispersoid transformation under hydrodynamic effect on the hydro mixture, analytical and numerical calculations. The analysis of the aspects of hydrodynamic phenomena and interactions made it possible to substantiate the dispersoid formation process based on the intensification of microdisintegration and to identify the characteristic impact factors as well. Based on the theory of changes in the thermodynamic potential of the system of particle surfaces under dynamic exposure, a method has been proposed for determining the hydrodynamic variation parameters of the hydromixture structural component in the closed cavity of the generator when interacting with the elements of the enclosing and reflecting surfaces. The performed numerical calculations allowed to reveal a significant increase in the specific interphase surface of the dispersoid of the mineral component. The interaction of the elements of enclosing and reflecting surfaces according to the proposed innovative layout of elements location in the generator under the directed supply of the hydromixture from the nozzle into a closed cavity resulted in the increase from 3 to 4 times. A new design of a hydrodynamic generator and a flow diagram have been introduced on order to activate the extraction process of microparticles of valuable components.

Keywords: high-clay sands, hydrodynamic phenomena, microdisintegration, thermodynamic potential, hydrodynamic generator, cavitation reactor

Funding: The research was carried out using the facilities of the Research Equipment Sharing Center "Scientific Data Processing and Storage Center of the Far Eastern Branch of the Russian Academy of Sciences" funded by the Russian Federation through the Ministry of Science and Higher Education of the Russian Federation under the project no. 075-15-2021-663.

For citation: Khrunina N. P. Influence of hydrodynamic effects on dispersoid structural changes under microdisintegration. *Nauki o Zemle i nedropol'zovanie = Earth sciences and subsoil use.* 2022;45(3):294-304. (In Russ.). <https://doi.org/10.21285/2686-9993-2022-45-3-294-304>.

Введение

Особую часть аллювиальных природных и техногенных полиминеральных месторождений юга Дальневосточного региона России составляют глинистые и высокоглинистые россыпи с преобладанием тонкодисперсных и наноразмерных частиц ценных компонентов, потери которых в процессе эксплуатации достигают значительной величины [1]. В последнее время усиленное внимание уделяется экологическим аспектам защиты окружающей среды. Анализ работы шлюзов, барабанных дезинтеграторов и гидравлических центробежных дезинтеграторов, которые являются наиболее известными новейшими и испытанными в производственных условиях конструкциями, показывает, что данные установки предназначены для предварительной дезинтеграции глинистых песков и применение их на объектах с преимущественно тонкодисперсными частицами ценных компонентов не обеспечит существенного снижения потерь [2–8]. Интересны подходы к анализу перспектив развития акустической и гидродинамической кавитации исследователей из Японии и Китая. Отмечается использование акустического кавитатора в лабораторных условиях для получения металлов, оксидов металлов, халькогенидов, карбидов металлов и углерода. Дальнейшее применение в промышленных масштабах кавитаторов значительно

затруднено из-за проблем масштабирования [9–12]. Отмечается также необходимость развития теоретических, вычислительных и экспериментальных методов исследования механизма генерации кавитации, которые еще недостаточно изучены при использовании экспериментальной визуализации потока, изображений частиц. Универсальные методы исследования и проектирования, закон масштабирования и метод оптимизации в данном направлении еще не созданы [13]. Развиваются нетрадиционные высокоэнергетические методы исследования дезинтеграции и вскрытия тонкодисперсных минеральных комплексов на основе излучающих систем, в том числе ультразвуковых [14–17]. Тем не менее данные технологии в сильной степени энерго затратны и пока не находят широкого применения в производстве.

Недостаточное качество процесса дезинтеграции высокоглинистых песков россыпей, существенные потери ценных компонентов, обусловленные не только отклонениями технологических режимов от оптимальных значений, но и несовершенством конструкций машин, высокая энергоемкость применяемого технологического оборудования снижают эффективность переработки золотосодержащих песков. Дифференцирование определенным образом процесса дезинтеграции на переработку крупных и мелких фракций позволит



обеспечить процесс микродезинтеграции и снизить потери тонких и мелких частиц ценных компонентов. Для обеспечения динамической устойчивости и улучшения качества процесса гидродинамические генераторы оснащают элементами кавитации. Конфигурация элементов, их расположение и форма достаточно разнообразны.

Материалы и методы исследования

Одной из фундаментальных задач процессов разрушения в жидкостях средах является выяснение природы возникновения и распространения волн, взаимодействующих с твердой минеральной составляющей пульпы. Процессы преобразования энергии посредством трансформации поступательных форм движения потоков гидросмеси в отражательные или колебательные от разных типов поверхностей могут вызывать существенное усиление разрушающего типа.

Понимание сложных механизмов взаимодействия волн и потоков, динамики их распространения и производимых гидродинамических эффектов может позволить управлять этими процессами. Рассмотрено равновесие действующих на частицу сил при гравитационном разделении твердого в гидросмесях, которое выражается зависимостью

$$Vp_hg - Vg \left[(1 - m) \int_{p_1}^{p_2} ydp_h + mp_{sr} \right] - VK \frac{1}{y(p_h)} grady(p_h) - av = 0, \quad (1)$$

где V – объем частицы; p_h – плотность частицы; g – вектор ускорения силы тяжести; m – содержание среды (воды) в единице объема взвеси; $\int_{p_1}^{p_2} ydp_h$ – доля фракции в диапазоне изменения плотности от p_1 до p_2 ; y – функция распределения частиц по плотности; p_{sr} – средняя плотность среды; K, a – коэффициенты; v – вектор средней скорости частицы.

Для обоснования процессов дезинтеграции минеральной составляющей гидросмеси в условиях резонансных акустических явлений в гидропотоке и определения технологических и конструктивных параметров систем, моделирующих кавитационные и гидродинамические эффекты, из всего многообразия подходов к решению поставленной задачи необходимо выявить факторы, влияющие на

характер протекания процесса [18–20]. Гидросмесь при дезинтеграции представляет собой жидкость с твердыми включениями. Известно, что прочность жидкости резко снижается при содержании в ней твердых частиц или газовых включений.

В ходе рассмотрения процесса подачи минеральной гидросмеси на ограждающую поверхность, касательная которой образует угол с осью струи, давление струи определяется по формуле

$$P = \frac{y}{g} Qv(1 + \cos \beta) = pQv(1 + \cos \beta) = \\ = pQv(1 + (-0,5)) = 0,5pQv, \quad (2)$$

где y – объемный вес жидкости; g – ускорение свободного падения; Q – расход жидкости; v – скорость струи жидкости; β – угол между касательной к ограждающей поверхности и осью струи; p – плотность гидросмеси.

Для усиления давления струи ограждающая поверхность должна быть плоской, тогда зависимость (2) преобразуется следующим образом:

$$P = \frac{y}{g} Qv = pQv. \quad (3)$$

Давление в таком случае увеличивается вдвое для активизации разрушающего эффекта твердой составляющей гидросмеси. Теоретические выводы по гравитационному разрушению минеральной составляющей гидросмеси дают общие представления о возникающих процессах в многокомпонентных средах при гидродинамических воздействиях, инициируемых различными источниками физического и механического влияния.

Задача теоретического изучения процесса дезинтеграции минеральной составляющей гидросмеси в условиях резонансных акустических явлений в гидропотоке и определения технологических и конструктивных параметров систем состоит в выявлении зависимостей с целью прогнозирования поведения и управления процессом для достижения практических важных условий осуществления способа в реальных условиях. Решение задачи существенно облегчается, если вместо самих процессов предварительно изучить их модели. Математические модели вследствие их относительной простоты помогают понять процесс, дают возможность установить характеристики, на основе которых можно пред-



определить необходимые структурные изменения изучаемой системы. Это позволяет в сложных случаях, связанных с затратами на проектирование и изготовление опытных образцов, без проведения натуральных экспериментальных исследований оценить идеальный замысел.

В связи с вышеизложенным цель представленного исследования состояла в том, чтобы на основе анализа аспектов гидродинамических явлений и взаимодействий посредством численных расчетов обосновать процесс образования дисперсоида высокоглинистых песков с повышенным содержанием мелкого и тонкодисперсного золота в условиях изменения гидродинамических параметров потока гидросмесей посредством ограждающих и отражающих поверхностей.

Результаты исследования и их обсуждение

Метод решения и численные расчеты.

Известно, что любая математическая модель должна удовлетворять требованию адекватности процесса, отражать наиболее существенные связи между величинами, характеризующими процесс, учитывать свойства среды, в которой происходит процесс, и информацию о начальном состоянии процесса. Модель должна быть также по возможности не слишком сложной, иметь аналитические или численные решения. Рассматривая гидродинамические явления в установках дезинтеграции закрытого типа при подаче пульпы через сопло, с учетом уравнения (3) необходимо получить данные о формируемом давлении P на ограждающую поверхность:

$$dP = \rho Q dv. \quad (4)$$

Данное давление будет зависеть от равновесной плотности гидросмеси ρ , объемного расхода гидросмеси Q и скорости потока струи v , падающего на ограждающую поверхность при условии, что поверхность направлена перпендикулярно струе и имеет плоскую форму. Равновесная плотность гидросмеси ρ зависит от объемного содержания в водонасыщенных песках воды a_v и минеральной составляющей a_m :

$$\rho = a_v \cdot p_v \cdot a_m \cdot p_m,$$

где p_v – плотность воды; p_m – плотность мине-

ральной составляющей при равновесном значении давления соответственно.

Расход гидросмеси задается, а скорость потока струи вычисляется по формуле

$$v = 4Q/\pi \cdot d^2, \quad (5)$$

где d – диаметр выходного сечения сопла.

Мощность струи W будет зависеть от гидродинамического давления P струи минеральной гидросмеси на площадь поверхности S_m , препятствующей потоку:

$$dW = S_m dP. \quad (6)$$

Физико-химические и структурные изменения нарастают по мере увеличения длительности измельчения и определяются величиной подводимой энергии. Изменение термодинамического потенциала системы поверхностей частиц dE при динамическом воздействии будет зависеть от мощности струи W , коэффициента полезного действия и конструктивных особенностей установки n , а также времени воздействия подводимой энергии t :

$$dE = nWdt. \quad (7)$$

Количественная составляющая массы частиц неизменна, и интересующий нас процесс направлен на разделение частиц с увеличением площади поверхности массы частиц дисперсоида. Основываясь на теории первого и второго начал термодинамики, в которые входят основные виды энергии, с учетом уравнения Гиббса для гетерогенной системы получим зависимость изменения термодинамического потенциала системы поверхностей частиц при динамическом воздействии:

$$dE = edS \text{ или } dS = dEe^{-1}, \quad (8)$$

где e – удельная поверхностная энергия частиц; S – площадь межфазной поверхности частиц дисперсоида.

Подставляя выражение (7) в формулу (8), получим

$$dS = nWe^{-1}dt. \quad (9)$$

Получаем выражение для процесса преобразования твердой составляющей в гидросмеси:

$$\int_{S_0}^{S_u} \frac{dS}{S} = nWe^{-1} \int_0^t dt. \quad (10)$$

Производя интегрирование, получаем зависимость для определения удельной межфазной поверхности системы частиц в выбранном размерном диапазоне измерения S_u , m^2 , для расчета в численном выражении:



$$S_u = S_0 \exp(Ee^{-1}), \quad (11)$$

где S_0 – исходная удельная межфазная поверхность системы частиц в выбранном размерном диапазоне измерения при $t=0$.

Полученные зависимости можно применять для численных расчетов разработанной и защищенной патентом установки.

Численные результаты расчетов. Расчеты проведены по формулам (4)–(11) для предварительной оценки гидродинамического влияния потока на процесс разрушения минеральной составляющей гидросмеси при взаимодействии гидросмеси с отражательной плоской поверхностью 1, элементами поверхности 4 и 5 установки гидродинамического генератора, разработанного автором статьи (рис. 1). Процесс осуществляется путем подачи гидросмеси из сопла 2 диффузора 3, отражения части потока от гидродинамического распределителя с перфорированными поверхностями 4, установленными выше и под углом к поверхности 1. В расчет включен также процесс попадания потока на верхнюю часть ребер вертикальных пластинчатых кавитационных элементов 5.

При проведении расчетов учитывались прочностные качества конструкции, все элементы выполнены из прочных материалов и закреплены жестко для исключения колебаний. Время воздействия потока на элементы принимаем равным 2 с. При содержании частей твердого 0,1 и воды 0,9 в гидросмеси рас-

четная равновесная плотность гидросмеси составляет величину 1076,3 кг/м³. Коэффициент полезного действия установки n принимаем равным 0,5. Удельная поверхностная энергия частиц σ равна $780 \cdot 10^{-7}$ Дж/см². Исходную удельную межфазную поверхность минеральных частиц $S_{0y\theta}$ при взаимодействии с первой ступенью принимаем равной $1,345 \cdot 10^5$ м⁻¹. При взаимодействии с остальными элементами величины исходных удельных поверхностей рассчитываются в результате преобразования твердого в гидросмеси. Диаметр выходного сечения сопла d принимаем равным 0,05 м. Диапазон изменения объемного расхода гидросмеси Q – от 0,02 до 0,1 м³/мин. Площадь отражательной плоской поверхности турбулизации S_m (см. рис. 1, 1) при радиусе, равном 0,1 м, составит 0,0314 м². Принято также, что величина объемного расхода гидросмеси Q после взаимодействия с первым элементом разделяется пополам, то есть на второй элемент направляется половина отраженного потока, а вторая половина направляется на третий элемент. При этом первая половина после взаимодействия со вторым элементом направляется к третьему элементу.

Результаты расчета изменения удельной межфазной поверхности системы частиц при преобразовании потока гидросмеси с учетом последовательного взаимодействия с элементами отражения струй представлены в таблице.

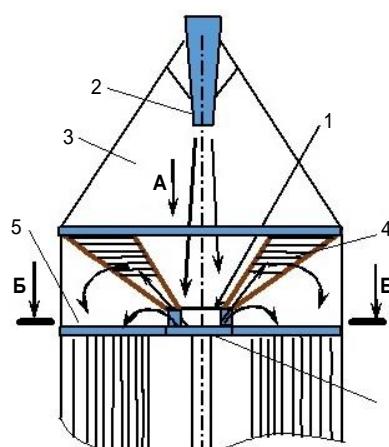


Рис. 1. Принципиальная схема инициирования гидродинамических эффектов на первой ступени генератора:

1 – отражательная плоская поверхность; 2 – сопло; 3 – диффузор; 4 – перфорированные поверхности;
5 – ребра вертикальных пластинчатых кавитационных элементов

Fig. 1. Schematic diagram of hydrodynamic effect initiation at the generator first stage:

1 – reflecting flat surface; 2 – nozzle; 3 – diffuser; 4 – perforated surfaces;
5 – ribs of vertical plate cavitation elements



Результаты расчетов изменения удельной межфазной поверхности частиц при последовательном взаимодействии с элементами отражения струй Calculation results of changes in the specific interphase surface of particles under sequential interaction with jet reflection elements

$Q, \text{м}^3/\text{мин}$	0,02	0,04	0,06	0,08	0,1
$S_{u1} \cdot 10^5, \text{м}^{-1}$	1,385	1,479	1,668	1,896	2,46
$S_{u2} \cdot 10^5, \text{м}^{-1}$	0,70177	0,78017	0,94325	1,1784	1,7345
$S_{0,u3} \cdot 10^5, \text{м}^{-1}$	1,3942	1,5197	1,777	2,1264	2,964
$S_{u3} \cdot 10^5, \text{м}^{-1}$	1,433	1,702	2,296	3,349	6,064
$S_{u4} \cdot 10^5, \text{м}^{-1}$	1,423	1,656	2,155	2,986	5,033

В ней приняты следующие обозначения: S_{u1} – величина удельной межфазной поверхности частиц после последовательного взаимодействия с первым элементом, S_{u2} – со вторым элементом, S_{u3} – с третьим элементом; S_{u4} – результирующая величина удельной поверхности частиц при прохождении без второго элемента; $S_{0,u3}$ – полученная после преобразования при прохождении через два элемента начальная расчетная величина исходной удельной поверхности частиц для расчета третьего элемента.

На рис. 2 представлена зависимость параметра удельной межфазной поверхности частиц при последовательном взаимодействии с тремя и двумя элементами отражения струй от объемного расхода гидросмеси. Все обозначения на рис. 2 соответствуют таблице и пояснению к ней.

В результате расчетов установлено, что определяющую роль в процессе микродезинтеграции минеральных частиц на трех ступенях взаимодействия играет изменение объемного расхода гидросмеси Q и скорости потока

в гидросмеси, выходящего из сопла при заданных параметрах, а также изменение термодинамического потенциала системы, зависящего от изменения массовой гидродинамической мощности системы, коэффициента полезного действия установки и времени воздействия. По мере увеличения объемного расхода и скорости потока удельная межфазная поверхность частиц после взаимодействия с первым элементом – отражательной плоской поверхностью – возрастает в 1,6 раза. При максимальном расходе гидросмеси после взаимодействия с двумя элементами – первым и вторым – рост удельной поверхности частиц увеличивается в 3 раза, а после взаимодействия со всеми тремя элементами – в 4 раза. Расчет показал, что при взаимодействии потока гидросмеси с первым и третьим элементами без взаимодействия со вторым элементом рост удельной поверхности увеличивается в 3,5 раза, то есть уменьшается на 16 % по сравнению с увеличением при прохождении через все три элемента.

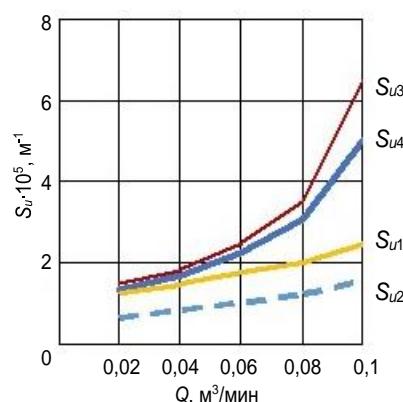


Рис. 2. Зависимость параметра удельной межфазной поверхности частиц от объемного расхода гидросмеси при последовательном взаимодействии с тремя и двумя элементами отражения струй

Fig. 2. Specific interphase particle surface parameter vs volumetric flow rate of the hydromixture under sequential interaction with three and two elements of jet reflection



Рекомендации для практического применения. В соответствии с результатами численного исследования была смоделирована основная часть конструкции гидродинамической установки для микродезинтеграции высокоглинистых песков россыпей с повышенным содержанием мелкого и тонкодисперсного золота (патент РФ № 2646270 от 2 марта 2018 г.)¹ (см. рис. 1). Доработанная конструкция гидродинамического генератора включает в нижней части конфузор и кавитационные порожки, которые будут обеспечивать дополнительную физико-механическую трансформацию минеральной глинистой составляющей гидросмеси (рис. 3).

Гидродинамические генераторы могут встраиваться в схему переработки после размыва песков и классификации (рис. 4). Гидросмесь с размером минеральных частиц на входе в генератор -5 мм после гидродинами-

ческих воздействий более эффективно пройдет стадию разделения на концентрационных столах с получением концентрата и хвостов (см. рис. 4). Выделенные на концентрационных столах хвосты с хвостами материала фракции +5 мм, прошедшиими стандартное разделение на шлюзах, отсадочных машинах и концентриаторах подвергаются выщелачиванию после дополнительной классификации и гидродинамической активации посредством кавитационных реакторов.

Дополнительная активация будет способствовать интенсификации процесса выщелачивания. С учетом влияния объемного расхода гидросмеси, гидродинамической мощности и формируемого термодинамического потенциала системы минеральная составляющая претерпевает изменения в сторону активного разрушения структурных и физико-механических связей мелких глинистых частиц,

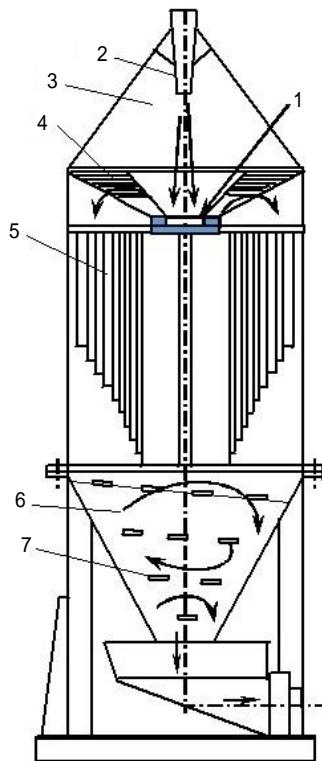


Рис. 3. Гидродинамический генератор:

1 – отражательная плоская поверхность; 2 – сопло; 3 – диффузор; 4 – перфорированные поверхности;
5 – ребра вертикальных пластинчатых кавитационных элементов; 6 – конфузор; 7 – кавитационные порожки

Fig. 3. Hydrodynamic generator:

1 – reflecting flat surface; 2 – nozzle; 3 – diffuser; 4 – perforated surfaces;
5 – ribs of vertical plate cavitation elements; 6 – confusor; 7 – cavitation steps

¹ Пат. № 2646270, Российская Федерация, МПК B03B 5/00. Способ инициирования кавитационно-гидродинамической микродезинтеграции минеральной составляющей гидросмеси: патент РФ / Н. П. Хрунина. Заявл. 12.04.2017; опубл. 02.03.2018. Бюл. № 7.



Рис. 4. Технологическая схема переработки высокоглинистых россыпей с использованием гидродинамических генераторов и кавитационных реакторов стационарного типа
Fig. 4. Flow diagram of high clay placer processing using hydrodynamic generators and stationary cavitation reactors

включающих ценные компоненты. В зависимости от типа структурных связей изменяются морфометрические и энергетические параметры системы. Данный эффект преобразования интенсифицирует физико-химическое влияние реагентов, обеспечивая снижение их расхода. Выполненные лабораторные исследования по активации подтверждают эффективность процесса извлечения ценных компонентов.

По укрупненным оценкам технологическая эффективность предлагаемой технологии с использованием дополнительной активации процесса образования микрочастиц дисперсOIDа по сравнению с известными технологиями на основе гравитационных методов извлечения ценных компонентов эффективнее в 3 раза. Использование установок, работа которых основана на новом принципе формирования гидродинамических явлений в гидропотоке, обеспечит эффективное разрушение ми-

неральной составляющей при низкой энергоемкости, определяющейся отсутствием вращающихся элементов внутри корпуса кавитационных реакторов. Установки обеспечивают высокую экологическую эффективность всего процесса путем снижения расхода весьма токсичных растворов для выщелачивания. Проблема извлечения тонкодисперсных частиц ценных компонентов из высокоглинистых россыпей и руд экологически более эффективным методом на основе интенсификации процесса микродезинтеграции остается актуальной.

Заключение

Таким образом, на основе теории изменения термодинамического потенциала поверхностей частиц при гидродинамическом воздействии автором представлен метод определения параметров изменения структурной составляющей гидросмеси в закрытой полости



генератора при взаимодействии с элементами ограждающих и отражающих поверхностей. В ходе проведенного исследования посредством численных расчетов обосновано увеличение удельной межфазной поверхности дисперсионного минеральных частиц на основе анализа гидродинамических явлений и взаимодействий, моделируемых стационарными отражательными элементами. Расчетным путем установлено существенное увеличение удельной межфазной поверхности дисперсионного минеральной составляющей. При направленной подаче гидросмеси из сопла в закрытую полость увеличение составило от 3 до 4 раз. Установлено, что конструктивные параметры системы генератора с включением

трех отражательных элементов более эффективны по сравнению с использованием двух элементов.

Помимо прочего, разработаны практические рекомендации по проектированию и применению гидродинамических генераторов для дезинтеграции высокоглинистых песков с повышенным содержанием мелкого и тонкодисперсного золота. Предложена новая конструкция гидродинамического генератора и технологическая схема для встраивания генераторов. Полученные предварительные данные и конструктивные решения, особенно в комбинации с процессами выщелачивания, перспективны для дальнейших исследований и требуют своего развития.

Список источников

1. Евдокимов С. И., Герасименко Т. Е., Троценко И. Г. Технико-экономическое обоснование эффективности совместной переработки руд и россыпей золота // Вестник Магнитогорского государственного технического университета им. Г. И. Носова. 2020. Т. 18. № 4. С. 12–23. <https://doi.org/10.18503/1995-2732-2020-18-4-12-23>.
2. Суримбаев Б. Н., Каналы Е. С., Болотова Л. С., Шалгымбаев С. Т. Оценка гравитационной обогатимости золотосодержащей руды – GRG // Горные науки и технологии. 2020. Т. 5. № 2. С. 92–103. <https://doi.org/10.17073/2500-0632-2020-2-92-103>.
3. Мамаев Ю. А., Хрунина Н. П. Определение оптимальных начальных параметров звукового воздействия на пульпу в зумпфовом накопителе при открытой разработке высокоглинистых россыпей // Горный информационно-аналитический бюллетень. 2009. № 7. С. 187–191.
4. Алексеев В. С., Серый Р. С., Соболев А. А. Повышение извлечения мелкого золота на промывочном приборе шлюзового типа // Обогащение руд. 2019. № 5. С. 13–18. <https://doi.org/10.17580/or.2019.05.03>.
5. Kochnev В. Г., Грушинская О. В. Дезинтеграция труднопромывистых песков с высокопластичной глиной // Золотодобыча. 2021. № 267. [Электронный ресурс]. URL: <https://zolotodb.ru/article/12508> (11.04.2022).
6. De Michelis I., Olivieri A., Ubaldini S., Ferella F., Beolchini F., Vegliò F. Roasting and chlorine leaching of gold-bearing refractory concentrate: experimental and process analysis // International Journal of Mining Science and Technology. 2013. Vol. 23. Iss. 5. P. 709–715. <https://doi.org/10.1016/j.ijmst.2013.08.015>.
7. Atici U., Comaklı R. Evaluation of the physico-mechanical properties of plutonic rocks based on texture coefficient // Journal of the Southern African Institute of Mining and Metallurgy. 2019. Vol. 119. Iss. 1. P. 63–69. <https://doi.org/10.17159/2411-9717/2019/v119n1a8>.
8. Sakuhuni G., Altun N. E., Klein B., Tong L. A novel laboratory procedure for predicting continuous centrifugal gravity concentration applications: the gravity release analysis // International Journal of Mineral Processing. 2016. Vol. 154. P. 66–74. <https://doi.org/10.1016/j.minpro.2016.07.004>.
9. Sun X., Chen S., Liu J., Zhao S., Yoon J. Y. Hydrodynamic cavitation: a promising technology for the industrial-scale synthesis of nanomaterials // Frontiers in Chemistry. 2020. Vol. 8. P. 259. <https://doi.org/10.3389/fchem.2020.00259>.
10. Choi J., Cui M., Lee Y., Ma J., Kim J., Son Y., et al. Hybrid reactor based on hydrodynamic cavitation, ozonation and oxidation of persulfate for the decomposition of oxalic acid in the processes of extraction of rare earth elements // Ultrasonics Sonochemistry. 2019. Vol. 52. P. 326–335. <https://doi.org/10.1016/j.ultsonch.2018.12.004>.
11. Gągol M., Przyjazny A., Boczkaj G. Wastewater treatment by means of advanced oxidation processes based on cavitation – a review // Chemical Engineering Journal. 2018. Vol. 338. P. 599–627. <https://doi.org/10.1016/j.cej.2018.01.049>.
12. Gągol M., Soltani R. D. C., Przyjazny A., Boczkaj G. Effective degradation of sulfide ions and organic sulfides in cavitation-based advanced oxidation processes (AOPs) // Ultrasonics Sonochemistry. 2019. Vol. 58. P. 104610. <https://doi.org/10.1016/j.ultsonch.2019.05.027>.
13. Kim H., Koo B., Sun X., Yoon J. Y. Investigation of sludge disintegration using rotor-stator type hydrodynamic cavitation reactor // Separation and Purification Technology. 2020. Vol. 240. P. 116636. <https://doi.org/10.1016/j.seppur.2020.116636>.
14. Кононов А. В., Дуйсебаев Б. О. Интенсификация сорбции урана из продуктивных растворов на ионообменную смолу ультразвуком // Горные науки и технологии. 2020. Т. 5. № 1. С. 12–24. <https://doi.org/10.17073/2500-0632-2020-1-12-24>.
15. Wu J., He J., Christakos G. Quantitative analysis and modeling of earth and environmental data: space-time



and spacetime data considerations. Amsterdam: Elsevier, 2021. 420 p.

16. Elshin V. V., Melnik S. A. Current status and perspectives of development technology gold desorption from the saturated activated carbon // Austrian journal of technical and natural sciences. 2014. Vol. 9-10. P. 114–118.

17. Chen J., Xu Z., Chen Y. Electronic structure and surfaces of sulphide minerals: density functional theory and applications. Amsterdam: Elsevier, 2020. 396 p.

18. Хрунина Н. П., Чебан А. Ю. Обоснование гидродинамической дезинтеграции минеральной составляющей гидросмеси высокоглинистых песков россыпей благородных металлов // Георесурсы. 2018. Т. 20. № 1. С. 51–56. <https://doi.org/10.18599/grs.2018.1.51-56>.

19. Сиротюк М. Г. Акустическая кавитация. М.: Наука, 2008. 270 с.

20. Кулагин В. А. Суперкавитация в энергетике и гидротехнике: монография. Красноярск: Изд-во КГТУ, 2000. 107 с.

References

1. Evdokimov S. I., Gerasimenko T. E., Trotsenko I. G. Feasibility study of the joint processing of gold ores and placers. *Vestnik Magnitogorskogo gosudarstvennogo tekhnicheskogo universiteta im. G. I. Nosova = Vestnik of Nosov Magnitogorsk State Technical University*. 2020; 18(4):12-23. (In Russ.). <https://doi.org/10.18503/1995-2732-2020-18-4-12-23>.
2. Surimbayev B. N., Kanaly E. S., Bolotova L. S., Shalgymbayev S. T. Assessment of gravity dressability of gold ore – GRG test. *Gornye nauki i tekhnologii = Mining Science and Technology (Russia)*. 2020;5(2):92-103. (In Russ.). <https://doi.org/10.17073/2500-0632-2020-2-92-103>.
3. Mamaev U. A., Khrunina N. P. Determination of optimal initial operation factors sonic impact on pulp in rock pool to open the exploitation of the mineral deposit. *Gornyj informatsionno-analiticheskij byulleten' = Mining informational and analytical bulletin*. 2009;7:187-191. (In Russ.).
4. Alekseev V. S., Seryy R. S., Sobolev A. A. Improving fine gold recovery in sluice boxes. *Obogashchenie rud*. 2019;5:13-18. (In Russ.). <https://doi.org/10.17580/or.2019.05.03>.
5. Kochnev V. G., Grushinskaya O. V. Disintegration of hard-to-wash sands and highly plastic clay. *Zolotodobycha*. 2021;267. Available from: <https://zolotodb.ru/article/12508> [Accessed 11th April 2022]. (In Russ.).
6. De Michelis I., Olivieri A., Ubaldini S., Ferella F., Beolchini F., Vegliò F. Roasting and chlorine leaching of gold-bearing refractory concentrate: experimental and process analysis. *International Journal of Mining Science and Technology*. 2013;23(5):709-715. <https://doi.org/10.1016/j.ijmst.2013.08.015>.
7. Atici U., Comakli R. Evaluation of the physico-mechanical properties of plutonic rocks based on texture coefficient. *Journal of the Southern African Institute of Mining and Metallurgy*. 2019;119(1):63-69. <https://doi.org/10.17159/2411-9717/2019/v119n1a8>.
8. Sakuhuni G., Altun N. E., Klein B., Tong L. A novel laboratory procedure for predicting continuous centrifugal gravity concentration applications: the gravity release analysis. *International Journal of Mineral Processing*. 2016; 154:66-74. <https://doi.org/10.1016/j.minpro.2016.07.004>.
9. Sun X., Chen S., Liu J., Zhao S., Yoon J. Y. Hydrodynamic cavitation: a promising technology for the industrial-scale synthesis of nanomaterials. *Frontiers in Chemistry*. 2020;8:259. <https://doi.org/10.3389/fchem.2020.00259>.
10. Choi J., Cui M., Lee Y., Ma J., Kim J., Son Y., et al. Hybrid reactor based on hydrodynamic cavitation, ozonation and oxidation of persulfate for the decomposition of oxalic acid in the processes of extraction of rare earth elements. *Ultrasonics Sonochemistry*. 2019;52:326-335. <https://doi.org/10.1016/j.ultsonch.2018.12.004>.
11. Gągol M., Przyjazny A., Boczkaj G. Wastewater treatment by means of advanced oxidation processes based on cavitation – a review. *Chemical Engineering Journal*. 2018;338:599-627. <https://doi.org/10.1016/j.cej.2018.01.049>.
12. Gągol M., Soltani R. D. C., Przyjazny A., Boczkaj G. Effective degradation of sulfide ions and organic sulfides in cavitation-based advanced oxidation processes (AOPs) // *Ultrasonics Sonochemistry*. 2019. Vol. 58. P. 104610. <https://doi.org/10.1016/j.ultsonch.2019.05.027>.
13. Kim H., Koo B., Sun X., Yoon J. Y. Investigation of sludge disintegration using rotor-stator type hydrodynamic cavitation reactor. *Separation and Purification Technology*. 2020;240:116636. <https://doi.org/10.1016/j.seppur.2020.116636>.
14. Kononov A. V., Duisebayev B. O. Ultrasonic intensification of uranium sorption from pregnant solutions by ion-exchange resin. *Gornye nauki i tekhnologii = Mining Science and Technology (Russia)*. 2020;5(1):12-24. (In Russ.). <https://doi.org/10.17073/2500-0632-2020-1-12-24>.
15. Wu J., He J., Christakos G. Quantitative analysis and modeling of earth and environmental data: space-time and spacetime data considerations. Amsterdam: Elsevier; 2021. 420 p.
16. Elshin V. V., Melnik S. A. Current status and perspectives of development technology gold desorption from the saturated activated carbon. *Austrian journal of technical and natural sciences*. 2014;9-10:114-118. (In Russ.).
17. Chen J., Xu Z., Chen Y. Electronic structure and surfaces of sulphide minerals: density functional theory and applications. Amsterdam: Elsevier; 2020. 396 p.
18. Khrunina N. P., Cheban A. Yu. Substantiation of the hydrodynamic disintegration of hydraulic fluid's mineral component of high-clay sand in precious metals placers. *Georesursy = Georesources*, 2018;20(1):51-56. <https://doi.org/10.18599/grs.2018.1.51-56>.
19. Sirotyuk M. G. Acoustic cavitation. Moscow: Nauka; 2008. 270 p. (In Russ.).
20. Kulagin V. A. Supercavitation in power engineering and hydraulic engineering. Krasnoyarsk: Krasnoyarsk State Technical University; 2000. 107 p. (In Russ.).

**Информация об авторе / Information about the author**

Хрунина Наталья Петровна,
кандидат технических наук,
ведущий научный сотрудник Лаборатории разработки россыпных месторождений,

Институт горного дела ДВО РАН – обособленное подразделение

Хабаровского Федерального исследовательского центра ДВО РАН,

г. Хабаровск, Россия,

npetx@mail.ru,

<https://orcid.org/0000-0001-8117-0922>.

Natalia P. Khrunina,

Cand. Sci. (Eng.),

Leading Researcher of the Laboratory of Placer Deposit Development,

Mining Institute, Far Eastern Branch of the Russian Academy of Sciences –

an autonomous subdivision of the Khabarovsk Federal Research Center

of the Far Eastern Branch of the Russian Academy of Sciences,

Khabarovsk, Russia,

npetx@mail.ru,

<https://orcid.org/0000-0001-8117-0922>.

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 10.06.2022; одобрена после рецензирования 14.07.2022; принята к публикации 18.08.2022.

The article was submitted 10.06.2022; approved after reviewing 14.07.2022; accepted for publication 18.08.2022.

**Научная статья****УДК 550.8.012**<https://doi.org/10.21285/2686-9993-2022-45-3-305-312>

Применение коэффициента вдавливания проппанта в дизайне гидравлического разрыва пласта для нефтематеринских пород

Арсен Альбертович Нуриев^a, Шамиль Ханифович Султанов^{a,b}^aУфимский государственный нефтяной технический университет, г. Уфа, Россия^bНаучный центр мирового уровня «Рациональное освоение запасов жидких углеводородов планеты», г. Уфа, Россия

Автор, ответственный за переписку: Нуриев Арсен Альбертович, arn.nuriev@yandex.ru

Резюме. Цель представленного исследования заключалась в лабораторном определении коэффициентов вдавливания расклинивающего материала в зависимости от геологического состава нефтематеринских пород и их применения при составлении дизайна гидравлического разрыва пласта. Для лабораторных исследований использовался керновый материал нефтематеринских отложений доманиковой свиты. Вдавливание проппанта осуществлялось на испытательном прессе ИП-100, для исключения погрешности измерений производилось дополнительное уточнение размерности ячеек под микроскопом ADF U300P с возможностью работы только в отраженном или отраженном и проходящем свете. В результате работы были подтверждены геологические особенности доманикового комплекса: на керновом материале прослеживалось большое содержание органического вещества, основная масса породы была сложена карбонатами с частым литологическим переслаиванием. Вдавливание для проппанта размерности 20/40 составило: в известняках – 0,2–0,4 мм, в глинизированных известняках – 0,23–0,45 мм, для органического вещества – 0,47 мм. Для проппанта размерности 30/50 были получены следующие показатели вдавливания: в известняках – 0,1–0,5 мм, в глинизированных известняках – 0,13–0,55 мм, для органического вещества – 0,47 мм. Применение полученных коэффициентов в дизайне гидравлического разрыва пласта позволило уточнить закрепленную ширину раскрытия трещины, что при последующем моделировании должно положительно отразиться на прогнозируемом запускном дебите скважины. Вдавливание проппанта имеет прямую зависимость от состава нефтематеринских пород. При использовании коэффициентов расклинивающего материала стоит обращать дополнительное внимание на карту трекинга проппанта. Использование лабораторных исследований с последующим моделированием в симуляторе гидравлического разрыва пласта позволяет более точно понимать закрепленную геометрию трещины гидравлического разрыва пласта. Оценка ширины раскрытия трещины позволяет на этапе дизайна гидравлического разрыва пласта адаптировать параметры мероприятия, что положительно оказывается на продолжительности жизни ширины трещины и, соответственно, на дебите скважины.

Ключевые слова: нефтематеринские породы, доманиковый комплекс, гидравлический разрыв пласта, коэффициент вдавливания проппанта

Финансирование: Работа выполнена при поддержке Министерства науки и высшего образования Российской Федерации (соглашение № 075-15-2022-297) в рамках программы развития Научного центра мирового уровня «Рациональное освоение запасов жидких углеводородов планеты».

Для цитирования: Нуриев А. А., Султанов Ш. Х. Применение коэффициента вдавливания проппанта в дизайне гидравлического разрыва пласта для нефтематеринских пород // Науки о Земле и недропользование. 2022. Т. 45. № 3. С. 305–312. <https://doi.org/10.21285/2686-9993-2022-45-3-305-312>.

Original article

Using proppant indentation coefficient in design of hydraulic fracturing treatment of oil source rocks

Arsen A. Nuriev^a, Shamil Kh. Sultanov^{a,b}^aUfa State Petroleum Technological University, Ufa, Russia^bInternational Standard Research Center “Rational development of the planet's liquid hydrocarbon reserves”, Ufa, Russia
Corresponding author: Arsen A. Nuriev, arn.nuriev@yandex.ru

Abstract. The purpose of the study is the laboratory determination of proppant indentation coefficients depending on the geological composition of the oil source rocks and their application in the design of hydraulic fracturing treatment. The laboratory researches used the core material of oil-producing deposits of the Domanic formation. The indentation of prop-



part was carried out on the CTM-100 compression testing machine, in order to eliminate the measurement error, the size of the cells was additionally specified using ADF U300P microscope with the operation capacity either in reflected light or reflected and transmitted light only. As a result, the geological features of the Domanic complex were confirmed: a large content of organic matter was traced on the core material, the bulk of the rock was composed of carbonates with frequent lithological layering. The indentation coefficient of 20/40 proppan were as following: 0.2–0.4 mm in limestones, 0.23–0.45 mm in clay limestones, 0.47 mm for organic matter. The indentation coefficients for 30/50 proppant were as follows: 0.1–0.5 mm in limestones, 0.13–0.55 mm in clay limestones, 0.47 mm in organic matter. The use of the obtained coefficients in the design of hydraulic fracturing treatment allowed to specify the fixed width of the crack opening that will have a positive effect on the predicted starting well yield under subsequent modeling. The proppant indentation is in direct relationship to the composition of the oil-producing rocks. When using the proppant coefficients it is advisable to pay additional attention to the proppant tracking map. The use of laboratory studies with subsequent modeling in the hydraulic fracturing simulator allows more accurate understanding of the fixed geometry of the crack of the formation fracturing. Estimation of the crack opening width at the stage of hydraulic fracturing design makes it possible to adapt the parameters of formation treatment, which has a positive effect on the lifetime of the crack width as well as on the well yield.

Keywords: oil source rocks, Domanic complex, hydraulic fracturing treatment, proppant indentation coefficient

Funding: The research work was supported by the Ministry of Science and Higher Education of the Russian Federation under the agreement no. 075-15-2022-297 within the framework of the development program of the International Standard Research Center "Rational development of the planet's liquid hydrocarbon reserves".

For citation: Nuriev A. A., Sultanov Sh. Kh. Using proppant indentation coefficient in design of hydraulic fracturing treatment of oil source rocks. *Nauki o Zemle i nedropol'zovanie = Earth sciences and subsoil use*. 2022;45(3):305-312. (In Russ.). <https://doi.org/10.21285/2686-9993-2022-45-3-305-312>.

Введение

На сегодняшний день поддержание и увеличение темпов добычи углеводородов является обязательным условием для недропользователей. На месторождениях с традиционными запасами углеводородов прослеживается снижение дебита эксплуатационных скважин и осложнение процесса прогнозирования результатов ввода новых скважин в разработку. В связи с этим нефтегазодобывающие предприятия вынуждены переводить в эксплуатацию нижележащие объекты, ранее не разрабатываемые. На данном этапе залежи традиционных углеводородов зачастую уже находятся на завершающей стадии разработки, поэтому предприятия вынуждены переходить к добыче трудноизвлекаемых запасов углеводородов. Помимо прочих к ним относятся пласты с нефтематеринскими породами – такие, как, например, доманиковая свита.

В рамках представленного исследования авторами были рассмотрены залежи трудноизвлекаемых запасов с точки зрения нефтематеринских пород. Залежи нефтематеринских пород характеризуются низкопроницаемыми коллекторами с зональной неоднородностью, практически полным отсутствием связанных пор и наличием большой доли твер-

дого органического вещества, составляющего значимую долю объема пород. В условиях нефтематеринских пород метод гидравлического разрыва пласта является обязательным условием для ввода скважины в эксплуатацию в связи с необходимостью создания зоны дренирования углеводородов.

По статистике, актуальной на 2020 г., только в 50 % операций гидравлического разрыва пласта на нефтематеринских породах были достигнуты плановые показатели запускного дебита. Было определено, что главной причиной таких показателей стала недостаточная геологическая изученность пород, а также неадаптивность дизайна гидравлического разрыва пласта и, как следствие, некорректно подобранная программа геолого-технического мероприятия.

Среди множества геолого-технологических факторов, оказывающих влияние на дизайн гидравлического разрыва пласта, в рамках данной работы рассмотрен коэффициент вдавливания проппанта для нефтематеринских пород. В связи с геологическими особенностями этих пород данный коэффициент оказывает большое влияние на прогнозируемую ширину трещины гидравлического разрыва пласта¹ [1, 2].

¹Дулкарнаев М. Р., Котенёв Ю. А., Султанов Ш. Х., Рабаев Р. У., Чудинова Д. Ю., Котенёв А. Ю. Методическое обоснование выработки залежей нефти в неоднородных сильнорасчлененных пластах: учеб. пособие. Уфа: Изд-во УГНТУ, 2020. 116 с.



Предметом исследований стали нефтематеринские породы доманикового возраста территории Республики Башкортостан. Указанный выбор обусловлен подтвержденной нефтеносностью и необходимостью в повышении процента успешности проводимых мероприятий. По результатам опробования 65 скважин на приток углеводородов только в 11 случаях был получен приток нефти, в остальных случаях была зафиксирована вода или глинистый раствор [3]. В ходе анализа данной ситуации было установлено, что положительный эффект напрямую связан с геологическим составом пород: по объектам прослеживалось увеличение карбонатности разреза, а вследствие этого улучшались фильтрационно-емкостные свойства [4].

Материалы и методы исследования

Объектом исследования послужил керновый материал нефтематеринских пород доманикового возраста. Скважины-кандидаты подбирались с условием площадной отдаленности, для того чтобы полученные результаты были применимы к доманиковой свите независимо от региона ее распространения.

Керн представлен преимущественно известняками с высоким содержанием органического вещества. Известняки от темно-серого до черного цвета, микрокристаллические, биокластовые со структурой мадстоун, вакстоун, участками перекристаллизованные. На образцах прослеживается изменчивость концентрации органического вещества. Ярко выражен запах органики на свежем сколе. Присутствуют кремнисто-карбонатные и карбонатно-кремнистые породы – черные и темно-серые, с высоким содержанием органического вещества. Породы плотные, крепкие, слоистые. Переслаивание литологических разностей подчеркнуто горизонтальной ориентировкой биокластов. Биокласты представлены тентакулитами, стилиолинами, члениками криноидей, раковинным детритом. Встречаются редкие субгоризонтальные сомкнутые трещины, иногда разветвляющиеся [5–7].

Лабораторные исследования проводились на испытательном прессе ИП-100, предназначенному для определения степени сжатия ма-

териалов. Керновый материал помещался в твердосплавную обойму и располагался на измерительной поверхности. Гранулы проппанта размещались поверх образца и накрывались образцом керна этого же интервала для сохранения условий напластования.

В рамках исследований использовался проппант двух размерностей: 30/50 и 20/40. Данный выбор обусловливался тем, что при проведении гидравлического разрыва пласта на территории Башкортостана эти виды проппанта показывали наилучшие результаты по фиксации ширины трещины [8–10].

Давление на образец оказывалось посредством внешнего поршня и составляло в среднем 21,4 кН (учитывая площадь керна), что соответствует давлению схлопывания трещины по объекту исследования [11]. Фиксация измерений проводилась в специализированном программном продукте Graph. Далее производились математические расчеты по результатам микроскопических исследований. В ходе исследований использовался поляризационный прямой микроскоп ADF U300P с возможностью работы только в отраженном или отраженном и проходящем свете [12].

Основа для статистических данных была взята из открытых опубликованных источников.

Результаты исследования и их обсуждение

В условиях трудноизвлекаемых запасов необходимо прорабатывать уникальный подход проведения гидравлического разрыва пласта для каждой скважины в отдельности. Использование опыта разработки традиционных запасов не подходит для трудноизвлекаемых залежей из-за их геологических характеристик: повышенной плотности пород, отсутствия связанных поровых каналов, высоких пластовых давлений и значений модуля Юнга [13]. В таких условиях характеристики вдавливания и разрушения проппанта оказывают большое влияние при моделировании ширины трещины [14]. Коэффициент вдавливания проппанта позволяет учитывать потери эффективной ширины закрепленной трещины на углубление расклинивающего материала в породу.



По результатам лабораторных исследований кернового материала были подтверждены и установлены определенные зависимости. Так, был детально рассмотрен минералогический состав пород: подтверждено преимущественное распространение известняков, наличие глин и высокое содержание органического вещества, что отчетливо прослеживалось на свежих сколах. На образцах явно просматривалась изменчивость состава, которая заключалась в переслаивании литологических разностей. Вдавливание для проппанта размерностью 20/40 составило: в известняках – 0,2–0,4 мм, в глинизованных известняках – 0,23–0,45 мм, для органического вещества – 0,47 мм. Для проппанта размерности 30/50 были получены следующие показатели вдавливания: в известняках – 0,1–0,5 мм, в глинизованных известняках – 0,13–0,55 мм, для органического вещества – 0,47 мм. Обобщенные результаты исследований представлены в таблице.

Керновый материал дополнительно рассматривался под микроскопом с целью уточнения геологического состава и характеристик разрушения. Один из примеров вида лунки представлен на рис. 1.

Обобщенные результаты исследований Generalized research results

Проппант 20/40		Проппант 30/50	
Масса проппанта, кг	Глубина вдавливания проппанта, мм	Масса проппанта, кг	Глубина вдавливания проппанта, мм
0,7	0,4	0,7	0,5
1,5	0,4	1,5	0,4
2,1	0,2	2,1	0,1
2,8	0,2	2,8	0,1
3,5	0,2	3,5	0,1

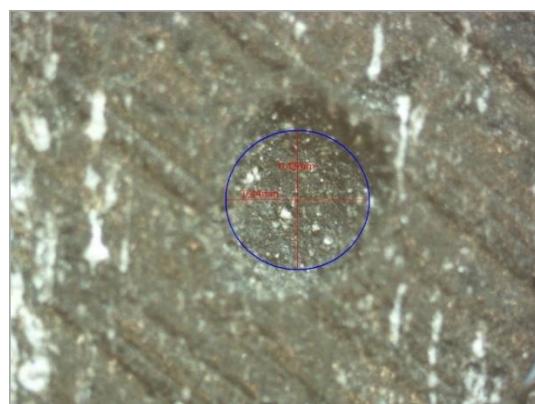


Рис. 1. Изображение лунки под микроскопом
Fig. 1. Image of the indentation cup under the microscope

На керновом материале, сложенном преимущественно из органики, определение размерности лунок было затруднено по причине того, что проппант вдавливался практически повсеместно и тем самым усложнял разделение границ. Ввиду их сверхмалых значений погрешность измерений промышленных установок возрастает. Микроскопические исследования позволили актуализировать значения вдавливания.

Для того чтобы учесть полученные результаты при составлении дизайна гидравлического разрыва пласта, необходимо подбирать соответствующее значение используемой массы проппанта [15].

В рамках программного продукта опция вдавливания проппанта работает следующим образом: она позволяет учесть потери эффективной ширины закрепленной трещины на вдавливание проппанта в стенки трещины и прочих предполагаемых эффектов, из-за которых достаточно малая ширина закрепленной трещины считается неэффективной [16]. При включении этой опции карта закрепленного раскрытия будет меньше везде на заданную величину вдавливания, кроме того, закрепленное раскрытие трещины будет прира-



внено к нулю везде, где площадная концентрация проппанта будет меньше заданной величины. На картах проницаемости и проводимости трещины это будет учитываться [17]. Все геометрические параметры закрепленной трещины будут определяться уже после данной модификации карты закрепленного раскрытия.

На рис. 2 представлена карта закрепленного раскрытия ширины трещины, полученная при моделировании дизайна гидравлического разрыва пласта с учетом выведенных ранее коэффициентов. Как видно из рисунка, при использовании коэффициентов раскрытие ши-

рины трещины на определенных участках достигает нулевых значений. Исключение из дальнейшего прогноза этих зон не является критичным по причине того, что на участках с низкими значениями раскрытия трещины практически не производится миграция углеводородов.

Для выделения эффективных зон, влияющих на дальнейший прогноз, следует дополнительно опираться на карту трекинга проппанта, которая позволяет провести корреляцию между эффективной и неэффективной шириной трещин. Данная карта представлена на рис. 3.

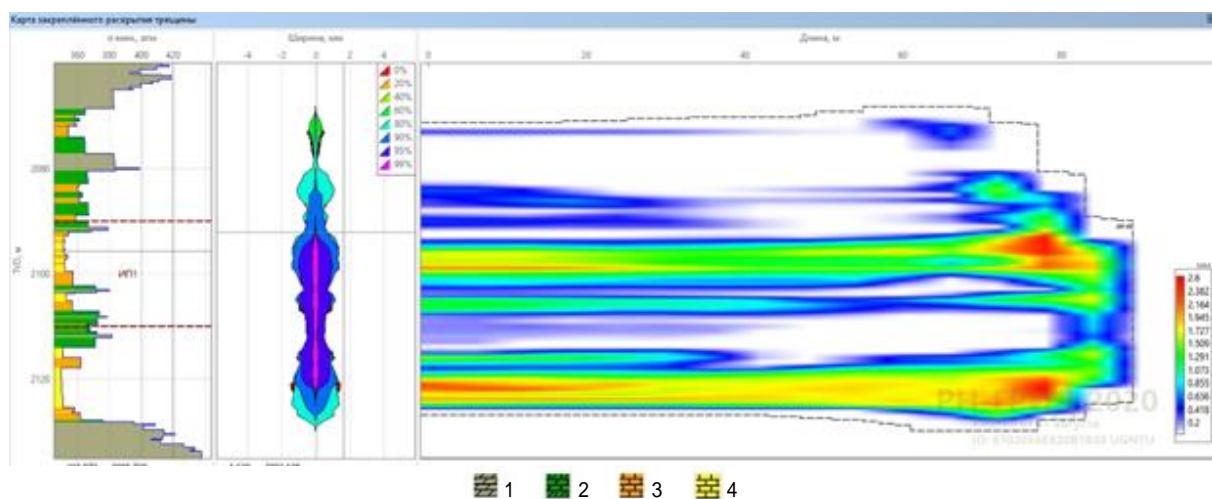


Рис. 2. Карта закрепленного раскрытия трещины, полученная с учетом необходимых коэффициентов:
1 – доломит; 2 – известняк; 3 – глинозированный известняк; 4 – песчаник

Fig. 2. Map of the fixed crack opening received with regard to all required coefficients:

1 – dolomite; 2 – limestone; 3 – clay limestone; 4 – sandstone

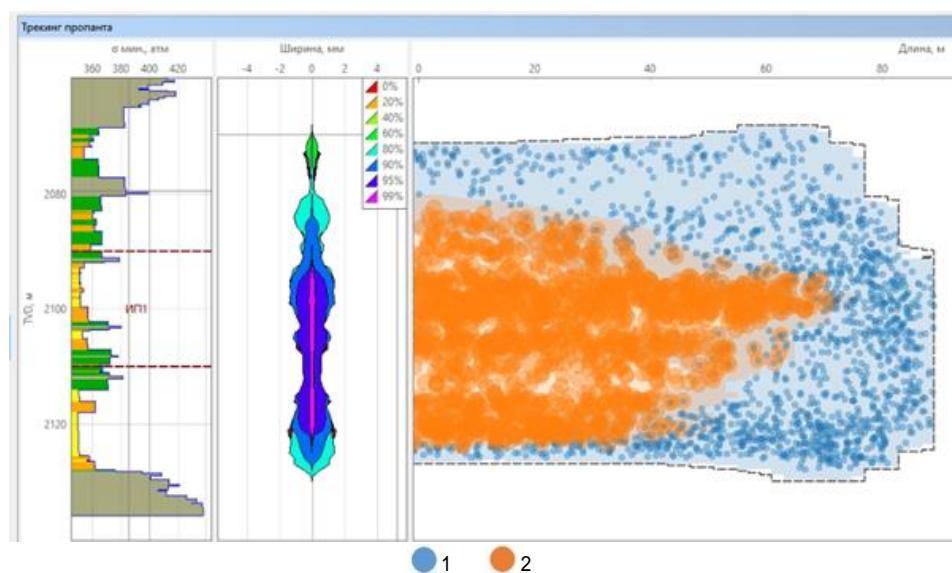


Рис. 3. Карта трекинга проппанта:
1 – размерность проппанта 30/50; 2 – размерность проппанта 20/40

Fig. 3. Proppant tracking map:

1 – 30/50 proppant; 2 – 20/40 proppant



Заключение

По итогам проведенных исследований можно сделать следующие выводы:

1. Вдавливание пропанта напрямую зависит от геологического состава пород. При изучении влияния коэффициента вдавливания необходимо обращать внимание на карту трекинга пропанта, которая позволяет отобразить расположение гранул в трещине.

2. Использование лабораторных исследований с последующим моделированием в симуляторе гидравлического разрыва пласта позволяет более точно понимать закреплен-

ную геометрию трещины гидравлического разрыва пласта.

3. Оценка геометрии трещины (на этапе дизайна) с учетом вдавливания позволяет проводить оптимизацию дизайна гидравлического разрыва пласта для доманиковых отложений, а именно подбирать такие параметры закачки (расходы жидкости разрыва, концентрацию и массу пропанта, объем буферной стадии), которые увеличат продолжительность «жизни» трещины гидравлического разрыва пласта, а следовательно, и добычу углеводородов.

Список источников

- Нуриев А. А., Кашапов Д. В., Султанов Ш. Х. Результаты применения полученных коэффициентов вдавливания расклинивающего материала при составлении дизайна гидравлического разрыва пласта для нефтематеринских пород // Вестник евразийской науки. 2022. Т. 14. № 1. URL: <https://esj.today/PDF/23NZVN122.pdf> (03.06.2022).
- Нуриев А. А. Некоторые аспекты проведения гидравлического разрыва пласта в нефтематеринских породах // Нефтегазовое дело. 2022. Т. 20. № 1. С. 39–44. <https://doi.org/10.17122/ngdelo-2022-1-39-44>.
- Султанов Ш. Х., Андреев В. Е. Комплексный подход к разработке крупных нефтяных месторождений с трудноизвлекаемыми запасами // Нефтепромысловое дело. 2009. № 3. С. 13–16.
- Кашапов Д. В., Федоров А. Э., Сергейчев А. В., Зейгман Ю. В. Эволюция развития технологий многостадийного гидроразрыва пласта на сланцевых объектах США // Нефтегазовое дело. 2021. Т. 19. № 5. С. 53–66. <https://doi.org/10.17122/ngdelo-2021-5-53-66>.
- Валеев А. С., Котенёв Ю. А., Котенёв А. Ю., Мухаметшин В. Ш., Султанов Ш. Х. Повышение эффективности выработки остаточных запасов нефти из низкопродуктивных коллекторов с использованием газового и водогазового воздействия // Геология, геофизика и разработка нефтяных и газовых месторождений. 2019. № 7. С. 59–64. [https://doi.org/10.30713/2413-5011-2019-7\(331\)-59-64](https://doi.org/10.30713/2413-5011-2019-7(331)-59-64).
- Тахаев А. А., Титов А. А. Изучение литологических особенностей доманиковых отложений Первомайского месторождения // Георесурсы. 2018. Т. 20. № 4. С. 324–330. <https://doi.org/10.18599/grs.2018.4.324-330>.
- Нестерова Г. В., Ященко И. Г., Назаров Л. А. Моделирование влияния вязкости пластовой нефти на распределение УЭС в окрестности скважины и скважинные измерения // Интерэкско ГЕО-Сибирь-2013: материалы IX Междунар. науч. конф. «Недропользование. Горное дело. Новые направления и технологии поиска, разведки и разработки месторождений полезных ископаемых. Геоэкология» (г. Новосибирск, 15–26 апреля 2013 г.). Новосибирск, 2013. Т. 2. С. 137–140.
- Салимов О. В., Гирфанов И. И., Зиятдинов Р. З., Махмутов И. Х., Салимов В. Г. Анализ опытно-промышленных работ по гидроразрыву пласта, кислотному гидроразрыву пласта и большеобъемной обработке призабойной зоны на мендымские, доманиковые и саргавьевские отложения // Территория «Нефтегаз». 2017. № 9. С. 86–92.
- Зубков М.Ю. Типы коллекторов в бажено-абалакском комплексе Западной Сибири и их генезис // Геология нефти и газа. 2019. № 4. С. 59–78. <https://doi.org/10.31087/0016-7894-2019-4-59-78>.
- Жданов С. А. Опыт применения методов увеличения нефтеотдачи пластов в России // Нефтяное хозяйство. 2008. № 1. С. 58–61.
- Кудряшов С. И., Бачин С. И., Афанасьев И. С., Латынов А. Р., Свешников А. В., Усманов Т. С. [и др.]. Гидроразрыв пласта как способ разработки низкопроницаемых коллекторов // Нефтяное хозяйство. 2006. № 7. С. 80–83.
- Меликбеков А. С. Теория и практика гидравлического разрыва пласта. М.: Недра, 1967. 140 с.
- Фёдорова Д. В., Астафьев А. А., Надеждин О. В., Латыпов И. Д. Петрофизическая модель баженовской свиты Приобского месторождения «Роснефти» // Деловой журнал Neftgaz.RU. 2020. № 6. С. 76–84.
- Кравченко М. Н., Мурадов А. В., Диева Д. Н., Переходжев Ф. А. ВПГ и ТГХВ на пластах баженовской свиты. Сравнительный анализ применения методов на базе математического моделирования // Деловой журнал Neftgaz.RU. 2018. № 3. С. 62–69.
- Карев В. И., Коваленко Ю. Ф., Негомедзянов В. Р. Исследование и прогнозирование устойчивости стволов горизонтальных скважин баженовских отложений, бурящихся на депрессии // Технологии топливно-энергетического комплекса. 2004. № 5. С. 18–23.
- Глухманчук Е. Д., Крупицкий В. В., Леонтьевский А. В. Баженовская нефть – «сланцевый технология» и отечественный опыт добычи // Недропользование XXI век. 2015. № 7. С. 32–37.
- Гладков Е. А. Предварительные результаты испытания новых технологий добычи нефти из отложений баженовской свиты // Территория «Нефтегаз». 2017. № 7-8. С. 50–57.



References

1. Nuriev A. A., Kashapov D. V., Sultanov Sh. Kh. The results of the application of the obtained coefficients of indentation of the wedging material in the design of hydraulic fracturing for source rock. *Vestnik evraziiskoi nauki = The Eurasian Scientific Journal*. 2022;14(1). Available from: <https://esj.today/PDF/23NZVN122.pdf> [Accessed 3^d June 2022]. (In Russ.).
2. Nuriev A. A. On the aspects of hydraulic fracturing in source rock. *Neftegazovoe delo = Petroleum Engineering*. 2022;20(1):39-44. (In Russ.). <https://doi.org/10.17122/ngdelo-2022-1-39-44>.
3. Sultanov Sh. Kh., Andreev V. E. An integrated approach to the development of major oil fields with hard-to-recover reserves. *Neftepromyslovoe delo = Oilfield engineering*. 2009;3:13-16. (In Russ.).
4. Kashapov D. V., Fedorov A. E., Sergeychev A. V., Zeigman Yu. V. Evolution of multistage hydraulic fracturing technologies development at US shale facilities. *Neftegazovoe delo = Petroleum Engineering*. 2021;19(5):53-66. (In Russ.). <https://doi.org/10.17122/ngdelo-2021-5-53-66>.
5. Valeev A. S., Kotenev Yu. A., Kotenev A. Yu., Mukhametshin V. Sh., Sultanov Sh. Kh. Efficiency enhancement of residual oil reserves recovery from low-productive reservoirs using gas and water-gas impact. *Geologiya, geofizika i razrabotka neftyanykh i gazovykh mestorozhdenii = Geology, geophysics and development of oil and gas fields*. 2019;7:59-64. (In Russ.). [https://doi.org/10.30713/2413-5011-2019-7\(331\)-59-64](https://doi.org/10.30713/2413-5011-2019-7(331)-59-64).
6. Takhaev A. A., Titov A. A. Study of the lithological characteristics of Domanic deposits of the Pervomayskoe field. *Georesursy = Georesources*. 2018;20(4):324-330. (In Russ.). <https://doi.org/10.18599/grs.2018.4.324-330>.
7. Nesterova G. V., Yashchenko I. G., Nazarov L. A. Modeling the influence of the formation oil viscosity on specific resistivity distribution near the well and downhole measurements. In: *Interekspo GEO-Sibir'-2013: materialy IX Mezhdunar. nauch. konf. "Nedropol'zovanie. Gornoе delo. Novye napravleniya i tekhnologii poiska, razvedki i razrabotki mestorozhdenii poleznykh iskopаемых. Geokologiya" = Interekspo GEO-Siberia-2013: proceedings of the 9th International scientific conference. "Subsoil use. Mining. New directions and technologies of prospecting, exploration and development of mineral deposits. Geoecology". 15–26 April 2013, Novosibirsk. Novosibirsk; 2013, vol. 2, p. 137–140.* (In Russ.).
8. Salimov O. V., Girfanov I. I., Ziyatdinov R. Z., Makhmutov I. K., Salimov V. G. Analysis of pilot hydrofrac, acid hydrofrac and large-volume bottomhole treatments in Mendymskian domanicites and Sargaevskian domanikoids. *Territorija "Neftegas" = Oil and Gas Territory*. 2017; 9:86-92. (In Russ.).
9. Zubkov M. Yu. Reservoir types in the Bazhenov-Abalak series of Western Siberia and their genesis. *Geologiya nefti i gaza = Oil and gas geology*. 2019;4:59-78. (In Russ.). <https://doi.org/10.31087/0016-7894-2019-4-59-78>.
10. Zhdanov S. A. Experience of oil recovery enhancement methods implementation of in Russia. *Neftyanoe khozyaistvo = Oil Industry*. 2008;1:58-61. (In Russ.).
11. Kudryashov S. I., Bachin S. I., Afanasyev I. S., Latypov A. R., Sveshnikov A. V., Usmanov T. S., et al. Hydrofracturing as a way of low-permeable reservoirs development. *Neftyanoe khozyaistvo = Oil Industry*. 2006;7:80-83. (In Russ.).
12. Melikbekov A. S. *Theory and practice of formation hydraulic fracturing*. Moscow: Nedra; 1967. 140 p. (In Russ.).
13. Fedorova D. V., Astaf'ev A. A., Nadezhdin O. V., Latypov I. D. Petrophysical model of the Bazhenov formation of the Priobskoye field of Rosneft. *Delovoi zhurnal Neftegaz.RU = Business magazine Neftegaz.RU*. 2020;6: 76-84. (In Russ.).
14. Kravchenko M. N., Muradov A. V., Dieva D. N., Perekhozhev F. A. In-situ combustion and thermal-gas-chemical formation treatment in the Bazhenov formation beds. Comparative analysis of the methods application based on mathematical modeling. *Delovoi zhurnal Neftegaz.RU = Business magazine Neftegaz.RU*. 2018;3:62-69. (In Russ.).
15. Karev V. I., Kovalenko Yu. F., Negomedzyanov V. R. Research and prediction of the stability of Bazhenov deposit horizontal wells drilled in depression. *Tekhnologii toplivno-energeticheskogo kompleksa*. 2004;5:18-23. (In Russ.).
16. Gluhanchuk E. D., Krupizkyi V. V., Leontyevsky A. V. Bazhenov oil – "shale technology" and domestic experience production. *Nedropolzovanie XXI vek = 21 Century Subsoil Use*. 2015;7:32-37. (In Russ.).
17. Gladkov E. A. Preliminary results of testing new oil recovery technologies at the deposits of the Bazhenov Formation. *Territorija "Neftegas" = Oil and Gas Territory*. 2017;(7-8):50-57. (In Russ.).

Информация об авторах / Information about the authors



Нуриев Арсен Альбертович,
аспирант,
Уфимский государственный нефтяной технический университет,
г. Уфа, Россия,
arn.nuriev@yandex.ru,
<https://orcid.org/0000-0002-6744-9289>.
Arsen A. Nuriev,
Postgraduate Student,
Ufa State Petroleum Technological University,
Ufa, Russia,
arn.nuriev@yandex.ru,
<https://orcid.org/0000-0002-6744-9289>.



Султанов Шамиль Ханифович,
доктор технических наук, профессор,
профессор кафедры геологии и разведки нефтяных и газовых месторождений,
Уфимский государственный нефтяной технический университет,
г. Уфа, Россия,
директор,
Научный центр мирового уровня «Рациональное освоение
запасов жидких углеводородов планеты»,
г. Уфа, Россия,
ssultanov@mail.ru,
SPIN-код: 7053-0235.
Shamil Kh. Sultanov,
Dr. Sci. (Eng.), Professor,
Professor of the Department of Geology and Exploration of Oil and Gas Fields,
Ufa State Petroleum Technological University,
Ufa, Russia,
Director,
International Standard Research Center “Rational development
of the planet's liquid hydrocarbon reserves”,
Ufa, Russia,
ssultanov@mail.ru,
SPIN: 7053-0235.

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 09.06.2022; одобрена после рецензирования 13.07.2022; принята к публикации 16.08.2022.

The article was submitted 09.06.2022; approved after reviewing 13.07.2022; accepted for publication 16.08.2022.



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 тематикам:

- 25.00.22. Геотехнология (подземная, открытая и строительная) (технические науки);
- 25.00.35. Геоинформатика (геолого-минералогические науки);
- 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 геологоразведочных 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;
 - акта экспертного заключения о возможности открытой публикации материалов;
 - сведений обо всех авторах на русском и английском языках с указанием названия вуза, организации, учреждения, должности и структурного подразделения, наличия ученой степени, ученого звания, почтового и электронного адресов каждого автора статьи;
- цветными портретными фотографиями авторов на светлом фоне (деловой стиль) в хорошем качестве в формате *.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 – Times New Roman, 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 подрисунковой подписью, в которой представляется объяснение всех его элементов. Названия рисунков и подрисунковые 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 представляется 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 JPEG / PNG (сохранение в формате JPEG / PNG 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 представляются с расширением .xis (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, из них



не менее 5 ссылок на статьи из иностранных журналов. При этом самоцитирование автора не должно превышать 25 % от общего количества источников и полностью исключается самоцитирование журнала. Не допускаются ссылки на законы, государственные стандарты, положения, диссертации и авторефераты, учебники и учебные пособия, справочники, словари и энциклопедии, а также геологические карты. При необходимости обращения к этим источникам ссылку на них следует размещать в подстрочной сноске. Редакционная коллегия рекомендует в списке литературы ссылаться на статьи из журналов, входящих в международные базы данных по глобальным индексам цитирования (Scopus, Web of Science и другие).

14. Список литературы составляется в двух вариантах. В библиографическом описании статьи необходимо указывать всех авторов. Первый вариант (библиографический список) 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, редакция, 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)

Елена Михайловна Курчевская, Марина Владиславовна Яхно^b,

Аркадий Евгеньевич Сенченко^c

^{a,c}НИИПИ «Технологии обогащения минерального сырья», г. Иркутск, Россия

^bИркутский национальный исследовательский технический университет, г. Иркутск, Россия

Автор, ответственный за переписку: Яхно Марина Владиславовна, ymar@istu.edu

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-вкрашенные скопления в зонах дробления. На месторождении широко развиты метасоматиты кварц-серизитовой 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 серизитизированными, 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-порфиральное 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}NIFI TOMS (Scientific Research and Design Institute “Technologies of Minerals Separation”), Irkutsk, Russia

^bIrkutsk National Research Technical University, Irkutsk, Russia

Corresponding author: Marina V. Yakhno, ymar@istu.edu

Abstract. Purpose. The purpose of the article is investigation of the technological types of Tominskoe 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 compo-



sition. 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

Фото
автора

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.

Фото
автора

Яхно Марина Владиславовна,
старший преподаватель кафедры геологии и геохимии полезных ископаемых,
Иркутский национальный исследовательский технический университет,
г. Иркутск, Россия,
umar@istu.edu,
ORCID.

Marina V. Yakhno,
Senior Lecturer of the Department of Geology and Geochemistry of Minerals,
Irkutsk National Research Technical University,
Irkutsk, Russia,
umar@istu.edu,
ORCID.

Фото
автора

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 45 № 3 (80) 2022

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 29.09.2022 г. Формат 60×90/8.
Бумага офсетная. Печать цифровая. Усл. печ. л. 13,25.
Тираж 500 экз. Зак. 118. 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