

12+

# **НАУКИ О ЗЕМЛЕ И НЕДРОПОЛЬЗОВАНИЕ**

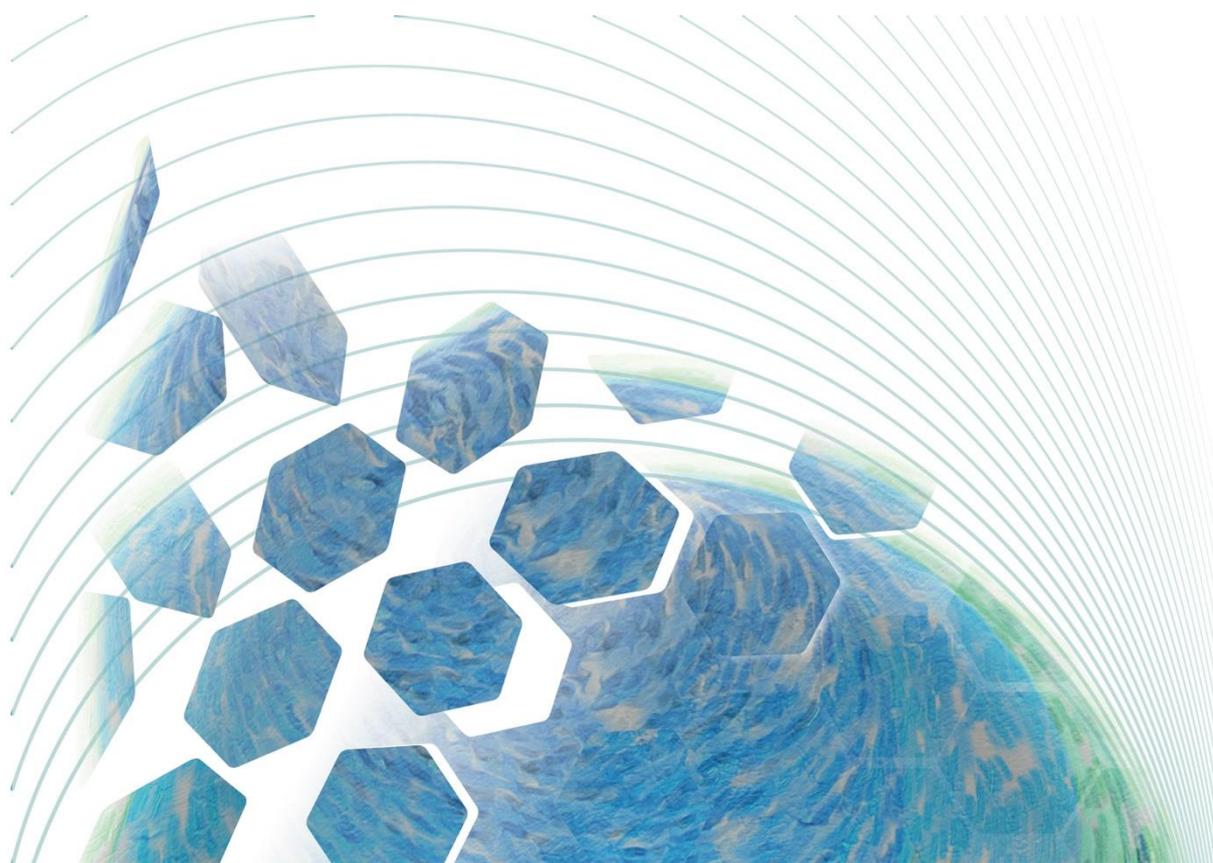
**Tom Vol. 42 № 3 2019**

# **EARTH SCIENCES AND SUBSOIL USE**

# НАУКИ О ЗЕМЛЕ И НЕДРОПОЛЬЗОВАНИЕ

Том  
Vol. 42 № 3 2019

## EARTH SCIENCES AND SUBSOIL USE



## Редакционный совет

**Кузьмин М.И.**, академик РАН, д-р г.-м. наук,  
Институт геохимии СО РАН (г. Иркутск, Россия)

**Гладкочуб Д.П.**, 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)

**Душин В.А.**, д-р геол.-минерал. наук, проф.,  
Уральский государственный горный университет  
(г. Екатеринбург, Россия)

**Козлов А.В.**, д-р геол.-минерал. наук, проф.,  
Национальный минерально-сырьевой  
университет «Горный»  
(г. Санкт-Петербург, 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)

**Мионов Ю.Б.**, д-р геол.-минерал. наук,  
Всероссийский научно-исследовательский  
геологический институт им. А.П. Карпинского  
(г. Санкт-Петербург, 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)

**Трубачев А.И.**, д-р геол.-минерал. наук, проф.,  
Забайкальский государственный университет  
(г. Чита, Россия)

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

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)

Заместители главного редактора:

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

**Красноштанов С.Ю.**, канд. техн. наук, доцент,  
Иркутский национальный исследовательский  
технический университет (г. Иркутск, Россия)

Ответственный секретарь:

**Храмовских В.А.**, канд. техн. наук, доцент,  
Иркутский национальный исследовательский  
технический университет (г. Иркутск, Россия)

Журнал «Науки о Земле и недропользование» **входит в действующий Перечень изданий ВАК для публикации основных результатов диссертаций на соискание ученой степени кандидата наук, на соискание ученой степени доктора наук**, включен в Научную электронную библиотеку (eLIBRARY.RU) для создания Российского индекса научного цитирования, рассылается в Российскую книжную палату, ВНИИТИ РАН, имеет государственную регистрацию и распространяется по подписке в каталоге агентства «Почта России», подписной индекс – 38200. Журнал включен в научную электронную библиотеку CyberLeninka, в базы данных открытого доступа DOAJ, OAJI, в международный каталог периодических изданий Ulrich's Periodicals Directory, в базу данных EBSCO. 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)

Свидетельство о регистрации журнала:  
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», 2019

## Editorial Council

**Kuzmin M.I.**, Academician of the Russian Academy of Sciences, Dr. Sci. (Geology and Mineralogy), 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)

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

**Dushin V.A.**, Dr. Sci. (Geology and Mineralogy), Professor, Ural State Mining University (Ekaterinburg, Russia)

**Kozlov A.V.**, Dr. Sci. (Geology and Mineralogy), Professor, National Mineral Resources University "Mining University" (St. Petersburg, Russia)

**Korolkov A.T.**, Dr. Sci. (Geology and Mineralogy), Professor, Irkutsk State University (Irkutsk, Russia)

**Makarov V.A.**, Dr. Sci. (Geology and Mineralogy), Professor, Siberian Federal University (Krasnoyarsk, Russia)

**Mironov Yu.B.**, Dr. Sci. (Geology and Mineralogy), **Karpinsky A.P.**, Russian Geological Research Institute (St. Petersburg, Russia)

**Ochir Gerel**, Dr. Sci. (Geology and Mineralogy), Professor, Mongolian University of Science and Technology (Ulan Bator, Mongolia)

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

**Trubachev A.I.**, Dr. Sci. (Geology and Mineralogy), Professor, Trans-Baikal State University (Chita, Russia)

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

Chairman of the Editorial Council

**Seminsky Zh.V.**, Dr. Sci. (Geology and Mineralogy), Professor, Irkutsk National Research Technical University (Irkutsk, Russia)

## Editorial Board

Editor-in-Chief

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

Deputy Editors-in-Chief

**Auzina L.I.**, Cand. Sci. (Geology and Mineralogy), Associate Professor, Irkutsk National Research Technical University (Irkutsk, Russia)

**Krasnoshtanov S.Yu.**, Cand. Sci. (Eng.), Irkutsk National Research Technical University (Irkutsk, Russia)

Executive secretary

**Khramovskikh V.A.**, Cand. Sci. (Eng.), Associate Professor, 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. It is officially registered and is distributed through the catalog of the "Russian Post" agency, the subscription index being 38200. The journal is included in CyberLeninka (the scientific electronic library), DOAJ, OAJI (open-access databases), Ulrich's Periodicals Directory, and EBSCO database. 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)

Journal Registration Certificate  
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', 2019

**СОДЕРЖАНИЕ**

Содержание.....	264
Колонка главного редактора.....	266
<b>Гидрогеология и инженерная геология</b>	
Хунан Тан, Тиантиан Чен, Бин Гон. Антарктическое таяние: природный или антропогенный процесс?.....	268
<b>Геозкология</b>	
Качор О.Л. Геозкологическая оценка влияния накопленных отходов бывшего мышьяковистого завода поселка Вершино-Дарасунский на объекты окружающей среды.....	279
<b>Геофизические методы поисков и разведки месторождений полезных ископаемых</b>	
Пустозеров М.Г. Комплексная аэрогеофизическая съемка при поисках медно-никелевых объектов на Дальнем Востоке.....	287
Башкеев А.С. Сравнение эффектов вызванной поляризации для гальванической и индукционной установок в методах переходных процессов.....	303
Бухалов С.В., Белова А.Ю., Давыденко Ю.А. Использование одномерной и трехмерной инверсии для определения поляризационных параметров рудных тел на Горном Алтае.....	312
<b>Технология и техника разработки месторождений полезных ископаемых</b>	
Авдеев А.Н., Сосновская Е.Л., Болотнев А.Ю. Естественное напряженно-деформированное состояние нижних горизонтов шахты Юго-Западная Дарасунского рудного поля.....	324
Заливин В.Г. Разработка композиций отверждаемых пен для тампонирувания скважин.....	336
<b>Технология обогащения и переработки минерального сырья</b>	
Лучко М.С., Федотов П.К. Испытания в промышленных условиях центробежной отсадочной машины для гравитационного обогащения руд цветных и благородных металлов.....	349
Михеев Г.В., Богйдаев С.А. Изыскание новых реагентов-собирателей для окисленных сурьмяных руд и оценка их флотационной активности по результатам квантово-химических расчетов на примере сурьмяной руды месторождения Жипхоша.....	358
<b>Геммология и технология художественной обработки минерального сырья</b>	
Мальцева Г.Д., Иванова Г.Н. Факторы, влияющие на эксплуатационную надежность облицовки полов, изготовленных из гранитных пегматитов.....	366
К сведению авторов.....	375



## CONTENTS

Contents.....	265
Chief Editor’s Column.....	267
<b>Hydrogeology and Engineering Geology</b>	
<b>Chunan Tang, Tiantian Chen, Bin Gong.</b> Antarctic melting: Natural or Anthropogenic?.....	268
<b>Geoecology</b>	
<b>Kachor O.L.</b> Environmental impact of the accumulated industrial waste: geo-ecological evaluation (a case study of the former arsenic plant, Vershino-Darasunsky settlement).....	279
<b>Geophysical Methods of Deposit Exploration and Prospecting</b>	
<b>Pustozerov M.G.</b> Integrated aerogeophysical survey in prospecting for copper-nickel deposits in the Far East of Russia.....	287
<b>Bashkeev A.S.</b> Induced polarization effects comparison for galvanic and induction installations in transient electromagnetic methods.....	303
<b>Bukhalov S.V., Belova A.Y., Davydenko Y.A.</b> One-dimensional and three-dimensional inversions in evaluating the ore bodies’ polarization parameters in the Altai Mountains.....	312
<b>Technology and Engineering of Deposit Development</b>	
<b>Avdeev A.N., Sosnovskaya E.L., Bolotnev A.Yu.</b> Initial stress-strain state of the Yugo-Zapadnaya mine lower horizons (the Darasunsky deposit).....	324
<b>Zalivin V.G.</b> Developing hardenable foam compositions for well tamping.....	336
<b>Technology of Mineral Processing and Benefication</b>	
<b>Luchko M.S., Fedotov P.K.</b> Industrial test of the centrifugal jigger for gravity concentration of non-ferrous and precious metal ore.....	349
<b>Miheev G.V., Bogidayev S.A.</b> Exploration of new collecting agents for oxidized antimony ores and estimation of their flotation activity based on the quantum-chemical calculation results: a case study of the Zhipkosha deposit.....	358
<b>Gemmology and Mineral Processing Art</b>	
<b>Maltseva G.D., Ivanova G.N.</b> Factors affecting the serviceability of granite pegmatite floor facing tiles.....	366
<b>Information for the Authors</b> .....	375



## Дорогие коллеги, авторы и читатели!

Перед Вами первый номер журнала, обновленного по названию, оформлению и ряду позиций его содержательного наполнения, издающегося Иркутским национальным исследовательским техническим университетом на протяжении многих лет, но развивающегося и меняющегося в соответствии с запросами времени. Необходимость вписаться в научный мейнстрим потребовала изменения качества контентного наполнения, обновления требований к нему, корректировки правил редакционной политики и, наконец, более лаконичного, но не менее емкого названия, чем прежде. С текущего номера журнал будет выходить как периодическое издание, касающееся широкого спектра теоретических и практических направлений геологии под соответствующим названием «Науки о Земле и недропользование».

Обновленная редакционная политика журнала, с которой все вы можете ознакомиться на нашем сайте, направлена на расширение научно-информационных и коммуникационных возможностей для авторов и читателей в России и за рубежом. Основная цель редакционной политики – сделать содержательное наполнение каждого выпуска не только доступным, но интересным и полезным для российских и зарубежных ученых и практиков. Первые шаги, которые предприняла редакционная коллегия журнала на этапе реновации, были направлены на включение в последующие номера статей, не переведенных на русский язык. Одна статья, присланная на английском и посвященная актуальной и важной дискуссии, связанной с причинами таяния льдов Антарктиды, публикуется в текущем номере («Antarctic melting: Natural or Anthropogenic?»).

К настоящему времени в редакционном портфеле на рассмотрении находится несколько работ на английском и китайском языках, присланных нашими иностранными коллегами. У российских ученых также есть потребность в публикациях на английском языке, несомненно, расширяющем возможности распространения научных идей в мировом научном сообществе, поддерживающем продуктивный обмен мнениями. Мы будем весьма признательны за понимание этой насущной необходимости, продиктованной современными тенденциями в науке, и с благодарностью примем ваши, дорогие российские коллеги, статьи, подготовленные на английском языке.

Этот предпринятый редакционной коллегией активный шаг, несомненно, способствующий углублению научных исследований, будет, кроме того, расширять горизонты на пути популяризации в мире достижений российской геологической науки и практики. Мы также надеемся, что изменение публикационной политики журнала будет стимулировать интерес не только к отдельным статьям наших авторов, но и к нашему журналу в целом.

Мы с большим уважением относимся к авторам журнала и стараемся по возможности облегчить процесс рецензирования, редактирования, предпечатной подготовки статей. Однако с не меньшим пиететом мы учитываем и пожелания наших читателей, тщательно отбираем статьи по их содержательному и качественному наполнению, вдумчиво работаем с авторами и рецензентами. В этом отношении редакционная политика журнала будет и впредь неизменной.

**Главный редактор  
Лобацкая Раиса Моисеевна**



## Dear colleagues, authors, and readers!

This is the first issue of the journal evolved from the one that has been published by Irkutsk National Research Technical University for many years. Following the demands of the time and the necessity of fitting into the scientific mainstream, we have renewed the contents quality requirements, updated the editing policy, and finally, changed the title to a more laconic one (though keeping the capacious character of the previous title). From this issue on, the journal is going to appear as a periodical related to a wide range of theoretical and practical directions in geology under the title Earth Sciences and Subsoil Use.

The updated editorial policy of the journal is available on our website. The policy is intended to enhance the scientific information and communication possibilities for the authors and readers in Russia and other countries, with the main aim to make the contents of the journal not only interesting but also useful for the researchers and experts. The first steps of the Editorial Board on the renovation stage are connected with accepting the articles submitted in languages other than Russian. One of the articles that deals with the important discussion on the causes of the Antarctic ice melting, is presented in the current issue (“Antarctic melting: Natural or Anthropogenic?”).

In the editorial portfolio, there are currently several works in English and Chinese, submitted by our foreign colleagues. The Russian researchers are also interested in expanding the opportunities for the circulation of scientific ideas in the world community and productive exchange of opinions. We are grateful to the authors for their understanding of this pressing need imposed by modern science tendencies, and will thankfully accept articles in English.

This active step of the Editorial Board is undoubtedly going to deepen scientific research and expand the horizons of the global popularization of Russian geological science and practice. We also hope that the renewal of the journal editorial policy will enhance the interest in the articles published, and in the journal in general.

We treat the authors with great respect and do our best to make the reviewing, editing and prepress preparation processes as easy as possible. We attach the same importance to the readers’ wishes by thoroughly selecting the articles by the contents and quality, and thoughtfully working with the authors and reviewers. The journal editorial policy in this regard will continue to be so.

**Raisa Moiseevna Lobatskaya,  
Editor-in-Chief**



Original article / Оригинальная статья  
УДК 556.3

## Antarctic melting: Natural or Anthropogenic?

© Chunan Tang<sup>a</sup>, Tiantian Chen<sup>b</sup>, Bin Gong<sup>c</sup>

<sup>a</sup>China University of Geosciences (Wuhan), Wuhan, China

<sup>a,c</sup>Dalian University of Technology, Dalian, China

<sup>b</sup>Northeastern University, Shenyang, China

**Abstract:** The melting process and mechanism of the Antarctic ice sheet and its influence on the global sea level change are the major issues of global concern, and also the hot topic of the recent year dispute. The global warming theory elegantly accounts for sea level rise due to the CO<sub>2</sub> greenhouse effect as a consequence of human activities, by accelerating the deglaciation in Antarctica. However, observations show that subglacial water such as the Lake Vostok beneath Antarctic ice sheet as a consequence of basal melting is an important source of water contributing to the rise in sea levels. Besides, basal melting will reduce the buttressing of ice shelves, which may lead to glacier thinning, its acceleration and grounding line retreat. Here, we considered that the high heat flux of the rock under the ice cover may provide an explanation of global sea level rise by leading to the ice melting under the thermal heated ice sheet. We think that the volcanic action, the high heat flow rifting effect and other geothermal resources are most of the important causes of the basal ice melting. These recent findings of ice melting beneath Antarctica highlight the need for better understanding subglacial geothermal sources, their hydrologic interactions with marine margins, and their possible roles in global climate change.

**Keywords:** Antarctic ice melting, rifting, heat flow, sea level

**Acknowledgements:** Supported by State Key Laboratory of Geological Processes and Mineral Resources, China University of Geosciences (Wuhan), China.

**Information about the article:** Received July 10, 2019; accepted for publication August 5, 2019; available online September 30, 2019.

**For citation:** Chunan Tang, Tiantian Chen, Bin Gong. Antarctic melting: Natural or Anthropogenic? *Earth Sciences and Subsoil Use*. 2019;42(3):268–278. (In Russ.)

## Антарктическое таяние: природный или антропогенный процесс?

© Хунан Тан<sup>а</sup>, Тиантиан Чен<sup>б</sup>, Бин Гонг<sup>с</sup>

Китайский геологический университет (Ухань), Ухань, Китай,

Даляньский технологический университет, Далянь, Китай,

Северо-Восточный университет, Шеньян, Китай

**Резюме:** Процесс и механизм таяния антарктического ледового щита и его влияние на глобальное изменение уровня моря являются основными проблемами, вызывающими общемировую обеспокоенность и горячие споры в течение последних лет. Теория глобального потепления элегантно объясняет повышение уровня моря из-за парникового эффекта CO<sub>2</sub> как следствие человеческой деятельности, ускоряющей деградацию Антарктики. Однако наблюдения показывают, что подледниковая вода, такая как озеро Восток под антарктическим ледяным покровом, возникшая вследствие таяния грунта, является важным источником воды, способствующим повышению уровня моря. Кроме того, подледниковое таяние способно уменьшить опору ледяных шельфов, что может привести к истончению ледника, его сокращению и отступлению от существующей линии границы. Мы посчитали, что высокий тепловой поток в горных породах под ледниковым щитом приводит к его термическому нагреву и таянию и тем самым может объяснить глобальное повышение уровня моря. Мы считаем, что наиболее важными причинами таяния базального льда являются вулканические воздействия вследствие эффекта рифтинга, высокий тепловой поток и другие геотермальные ресурсы. Эти недавние находки таяния льда под Антарктидой подчеркивают необходимость более глубокого понимания подледниковых геотермальных источников, их гидрологического взаимодействия с морскими окраинами и возможной роли в глобальном изменении климата.

**Ключевые слова:** таяние антарктического льда, рифтинг, тепловой поток, уровень моря

**Благодарности:** Выполнено при поддержке Ведущей государственной лаборатории геологических процессов и минеральных ресурсов, Китайский геологический университет, г. Ухань.

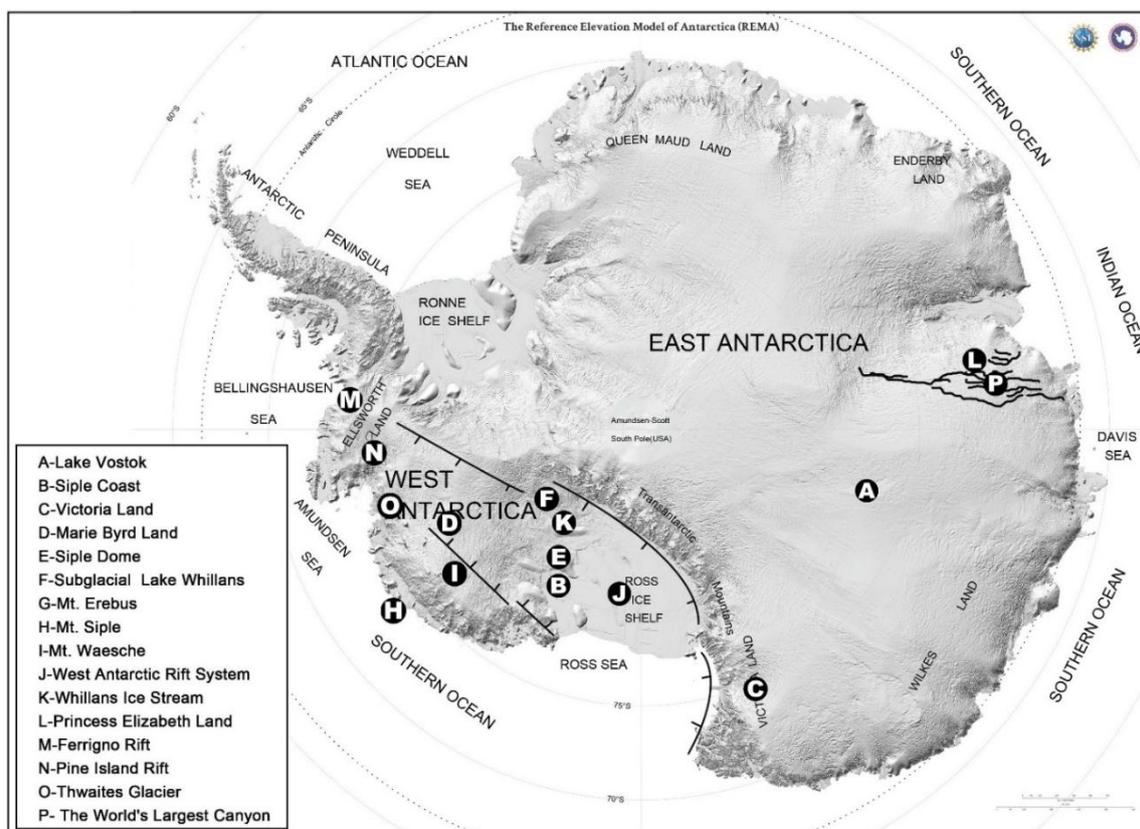


**Информация о статье:** Дата поступления 10 июля 2019 г.; дата принятия к печати 5 августа 2019 г.; дата онлайн-размещения 30 сентября 2019 г.

**Для цитирования:** Хунан Тан, Тиантиан Чен, Бин Гон. Антарктическое таяние: природный или антропогенный процесс? *Науки о Земле и недропользование*. 2019. Т. 42. № 3. С. 268–278.

The stability of the Antarctic ice sheet is of paramount importance to global sea level rise. However, climatic models describing responses of ice-sheet to global change are still not complete [1]. The global warming theory elegantly accounts for sea level rise due to melting ice in Antarctica, which is thought to be caused by the CO<sub>2</sub> greenhouse effect as a consequence of human activities [2]. It is believed that human activities deliver large amounts of CO<sub>2</sub> to the atmosphere, inducing the greenhouse effect, accelerating the deglaciation in Antarctica, and resulting in a big rise in sea level as a consequence of melting ice [2, 3]. However, this explanation does not appear to explain areas of unusually profuse subglacial melting underneath huge ice sheets on the continental lithosphere [4–12].

Subglacial water beneath Antarctic ice sheets as a consequence of basal melting is an important source of water contributing to the rise in sea levels. Besides, basal melting will reduce the buttressing of ice shelves, which may lead to glacier thinning, its acceleration and grounding line retreat, and melting land-ice cover may reduce load from the crust to activate elastic rebound [13]. Satellite data already revealed that no less than 200 buried lakes beneath Antarctica's continental ice sheet exist [9]; among them is the world's seventh largest lake, i.e., Lake Vostok (Fig. 1-A) located at the center of the East Antarctic Ice Sheet (Fig. 1) at approximately one kilometer deep with fourteen thousand square kilometers in area (Fig. 1).



**Fig. 1. Antarctica map displaying the main locations mentioned in this paper and the extent of the West Antarctic Rift System (redraw from Howat et al. [14])**

**Рис. 1. Карта Антарктики, показывающая основные места, упомянутые в статье, и Западно-Антарктическую рифтовую систему (взято из Howat et al. [14])**



Because its bed is grounded well to the continent, the subglacial melting underneath the Antarctic ice sheet may depend on geological controlled conditions at the base which are independent of climate. During the past few decades, researchers have recognized the solid Earth as a thermal system [15] and proposed an independent model of geothermal anomaly to account for this type of ice melting: high heat fluxes below subglacial rocks [10]. In recent years, China's scientists have made substantial progress in understanding Antarctic ice melting during their Antarctic exploration. Their 32nd expedition team detected large-scale "warm ice" under the sheet, along with a number of subglacial lakes [16]. Their onsite investigation suggests that geothermal anomalies are confined to the deep boundaries between ice and rock, which causes significant basal ice melting; they also found that many subglacial lakes and currents are interconnected, forming a giant "wetland" beneath the Antarctic ice. They recognized that such melting is more compatible with a deep, warm and distributed source controlled by the lithosphere, than with a surface effect controlled by climate warming.

Recently, more observations demonstrate that strong regional changes of the geothermal flux greatly influence the geothermal regime and the ice-base melting beneath the continental parts of its ice sheets [5, 11]. And as a results, large parts of its ice sheet are currently melting from below. Maule et al. [8] also found elevated heat fluxes both around Siple Coast and along the East-West Antarctica boundary (Fig. 1-B), and heat fluxes of similar high value were recorded around Victoria Land (Fig. 1-C) and near the shores of West Antarctica. At Siple Coast (Fig. 1-B), where elevated heat fluxes were found, several ice streams exist, and it was previously argued that heat from the ice sheet base might be one of the major trigger mechanisms for the formation of these fluxes [4–8]. The analysis of Rayleigh wave paths that cross Antarctica reveals low-velocity structures have been interpreted to support the Marie Byrd Land

(Fig. 1-D) hotspot hypothesis [17]. Energy balance models [18] prove that underneath one of the Siple Coast ice streams (Fig. 1-B), heat flux must be higher than  $80 \text{ mW/m}^2$  to keep ice-base melting, which is the same as they found for this area. The monitoring value at Siple Dome (Fig. 1-E) was  $69 \text{ mW/m}^2$  according to Engelhardt [7]. Fisher et al. [12] reported the geothermal heat flux measured directly for the first time from the ice base of the West Antarctic Ice Sheet (WAIS), below Subglacial Lake Whillans (Fig. 1-F), and determined this according to the geothermal gradient as well as the geothermal conductivity of sediments under the subglacial lake. At this site, a surprisingly high heat flux,  $285 \pm 80 \text{ mW/m}^2$ , was found, which is greatly higher than the continental and regional average values. They also found that the upward heat flux of  $105 \pm 13 \text{ mW/m}^2$  at the WAIS has been indicated by independent temperature measurements in the ice. The obvious difference between the heat fluxes might contribute to ice-base melting and/or be transferred from Subglacial Lake Whillans (Fig. 1-F) to other places through flowing water. Also, the formation of very abundant and dynamic ice streams and subglacial lakes could be explained by considering the high geothermal heat flux [12].

Although determining whether natural geothermal sources or anthropogenic  $\text{CO}_2$  effects cause ocean warming is complicated and very controversial, these matters become simpler for the continental lithosphere beneath the ice capes. It is well-known that the interior of the Earth is much hotter than the surface. The heat is partially leftover from the early Earth, however it is continuously produced by the radioactive element decay and the inner core crystallization [1, 19]. These are both important sources of heat to the flux released from the mantle. Where there is ice, the ice sheets function as a lid so that more heat is accumulated beneath the ice sheet. Therefore, in evaluating Antarctic ice melting, geothermal fluxes should be one of the most dynamically critical boundary conditions of ice sheets. Present global warming hypothesis seems to



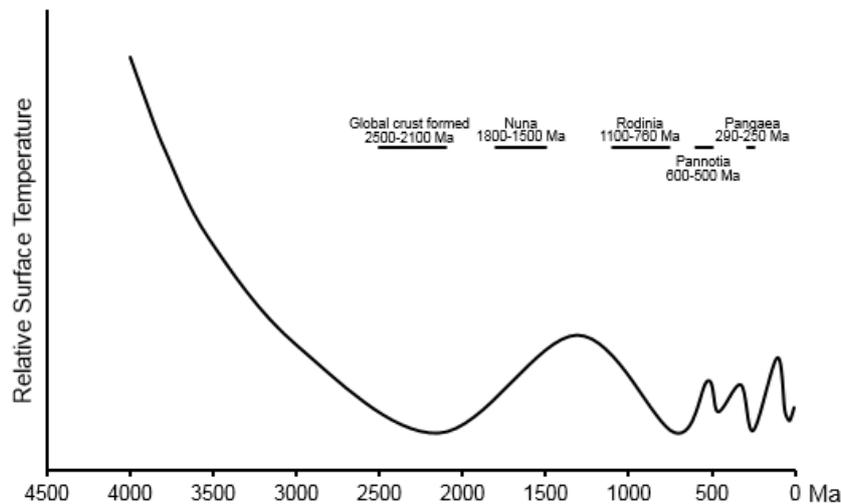
not account for these unexpected observations of the Antarctic basal ice melting as a consequence of geothermal heat flux anomalies.

In the longer term, Earth evolves as a thermal system. Our recent studies for Earth's thermal evolution, as shown in Fig. 2, suggest that Earth may experience extremely warming and cooling periods in terms of changes in the heat balance of the Earth system [15]. In the shorter term, however, the expansion of the lithosphere and its associated uplift may lead to rifts or fractures in Earth's crust, with volcanism and magmatism as the consequences. These may allow shortly a large quantity of heat release into the surface. Therefore, the supply of thermal energy makes basal ice melting, water production and reduction of basal friction unavoidable.

It is not difficult to understand these geothermal sources as a cause of the basal ice melting. The argument against this geothermal influence may be due to their time scales. It is generally believed that the effects of heating glaciers from below is a long-term issue rather than a short-term one, since the geothermal heat flux through the surface is generally considered to be a constant [1]. But thick ice sheets are sensitive to both temperature fluctuations from above and short-term geothermal heating from below, in terms of tectonic events,

which often take place in catastrophic ways. Unfortunately, in ice sheet dynamics, most existing models focus on the way they interact with climate system, only taking into account simplified representations of the solid Earth, for instance, by considering basal heat flux as a constant boundary condition or by modeling the lithosphere using a simple elastic plate [1]. Thus, the current models may fail to replicate in-site basal ice melting and temperature measurements of ice base in Antarctica.

Subglacial volcanism underneath the Antarctic ice sheet is recognized as one of the most important mechanisms related to possible short-term geothermal disturbances to basal ice melting. Maule et al. [8] found that areas of high heat flux are in accordance with currently known volcanism and several areas owning ice streams. Up to now, at least 138 volcanoes have been determined across West Antarctica [20], including the presently active volcano named Mt. Erebus [21] (Fig. 1-G) along the Terror Rift, as well as Mt. Siple [21] (Fig. 1-H) and Mt. Waesche [22] (Fig. 1-I), which both of them display evidence for recent activities [23]. Tectonic landforms reveal that the WAIS covers a huge volcanic rift system. The distribution of mantle helium in glacial melting water indicates that it is volcanic heat that leads to melting beneath the grounded glacier and contributes to the



**Fig. 2. Earth evolution as a thermal system**  
(relative surface temperature fluctuation, redraw from Tang and Li [15])

**Рис. 2. Эволюция Земли как тепловой системы**  
(относительные колебания температуры поверхности, Tang and Li [15])



subglacial hydrological system crossing the grounding line. Also, the visible surface deformations in the thickness of the WAIS demonstrate localized heat fluxes which are possibly volcanic, because of the intensity ([4, 21], while more recent eruptions are revealed by the ash layers from ice cores [24]. Several fast-flowing ice streams draining the WAIS's interior regulate the mass balance of the WAIS [25]. The presence of active volcanism beneath the WAIS would be able to trigger its collapse because of enhanced ice base melting [4], leading to as high as 6 m of sea-level rise [26]. The production of free water because of basal melting, a value highly depending on geothermal heat fluxes, is critical to the ice streams in terms of their initiation and maintenance [27].

Continental rifting, canyons or faults are other alternatives to the volcano. Geothermal forces will often cause crust expansion, which may cause propagating rifts, deepening canyons or even faults in terms of earthquakes, to provide passageways for deep heat to the surface. Normally, the geothermal flux is both higher and more variable for a rift system containing blocks of crust or sediments of varying thickness [7]. Although it is still unknown about the crustal structure, because of the vast size of the ice sheet, the West Antarctic Rift System (Fig.1-J) is believed to be one of the largest zones of abundant continental geothermal activities by connecting the land surface with the canyon bottom [28]. The widespread anomalous mantle heat flux in the active lake system of the lower part of the Whillans Ice Stream (Fig.1-K) is suggested to be linked to a rift source [29]. Jamieson et al. [30] found evidence showing that a previously undiscovered, large subglacial drainage network system is now hidden beneath the ice sheet in Princess Elizabeth Land (PEL) (Fig.1-L), which is believed to be tectonically linked to many long and deep canyons. Bingham et al. [31] hypothesize that the Neogene reactivation also occurred in the Ferrigno Rift (Fig.1-M) and Pine Island Rift (Fig.1-N) regions, potentially causing enhanced geothermal heat fluxes that would

increase the availability of meltwater at the base of the WAIS. Recently, by combining radar sounding and subglacial water routing, Schroeder et al. [11] show that the Thwaites Glacier (Fig.1-O) may be one of the most significant, rapidly developing and potentially unstable contributors to global sea level rise in West Antarctica reflecting a geothermal flux consistent with rift-associated magma migration as well as volcanism. Schroeder et al. [11] showed that the minimum average geothermal flux value in the Thwaites Glacier catchment is  $114 \pm 10$  mW/m<sup>2</sup>, in addition to areas owning high fluxes that exceed 200 mW/m<sup>2</sup>. Furthermore, their results indicate that the subglacial water network in Thwaites Glacier could be reflecting the heterogeneous and temporally variable ice-base melting induced by the development of the rift-associated volcanism and stand for the hypothesis that not only heterogeneous geothermal flux but also local magmatic processes might be dominant factors influencing the future behaviors of WAIS [11]. Again, China's 32nd Antarctic expedition team also contributed to this conclusion by confirming an earlier speculation that the South Pole is the site of the world's largest canyon (Fig.1-P).

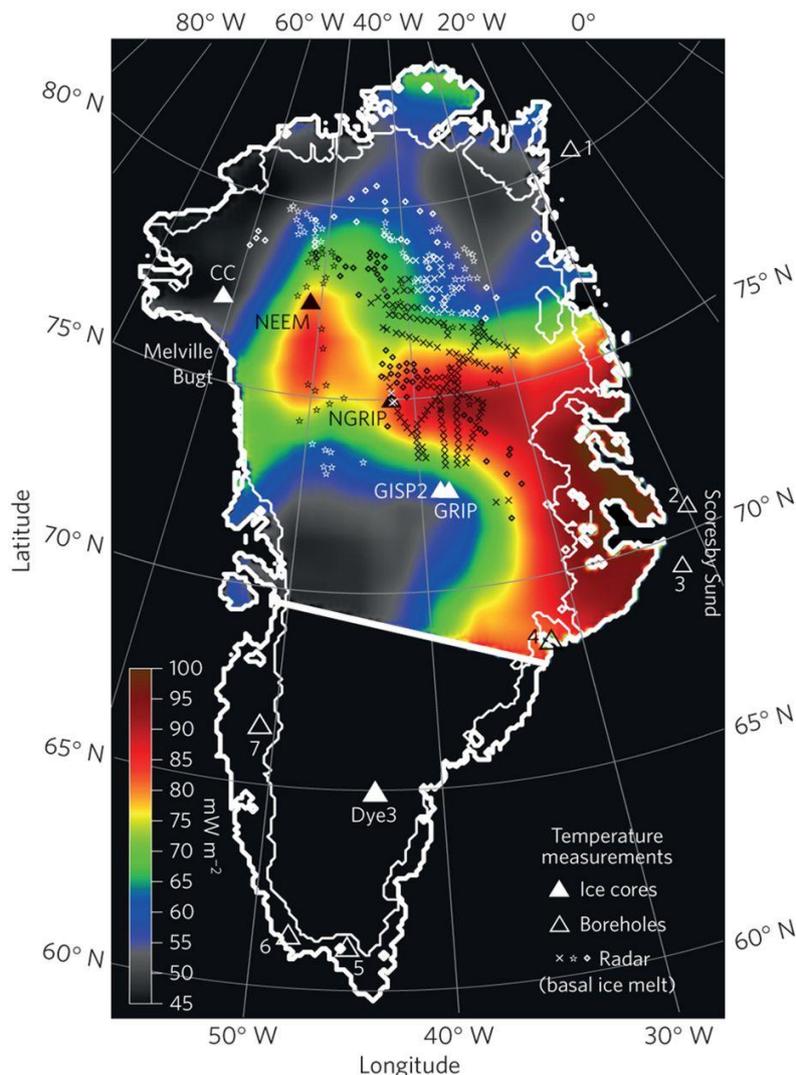
In addition to providing connections between the ice and the deep underground for geothermal-enhanced basal ice melting, the 'rift-directed' offshore troughs will also form putative routes. Through these routes, warm open ocean waters can flow back and further penetrate the continental shelf to attack the ice margin [31].

The findings of geothermal ice melting seem to provide new evidence that contradicts the current mainstream concept of Antarctic ice melting in terms of CO<sub>2</sub> effects, which may be underestimated or even ignored by climate scientists. Instead of seeking an additional heat source, for example, that from climate change, the observed heat anomaly between the basal ice and the solid Earth is able to potentially give reason for the regional patterns of basal melting beneath the Antarctic ice sheet. Also, the same mechanism is valid for Greenland, in which



geothermal heat fluxes from below are found to contribute to the conditions of basal ice melting underneath the ice caps, which sit atop a lithosphere of variable thickness (Fig. 3) [32]. Petrunin et al. [10] found that areas of rapid basal melting adjoins areas of extremely cold basal ice and the strong regional variations in ice-base conditions

actually result from the complex interactions between geothermal heat flow and glaciation-induced thermal perturbations in the upper crust over glacial cycles. Their findings indicate that the structure of the solid Earth plays a certain role in the dynamics of surface processes.



**Fig. 3. Predicted geothermal flux (GF) at 5 km below the bedrock surface of Greenland (with permission from Dr. I. Rogozhina [32])**

The GF was corrected for crustal heat production using a parameterization of radiogenic heat sources (see Methods in Rogozhina et al. [32]). The modelled thermal state of the GIS and lithosphere was calibrated by in situ data shown by white/black triangles, crosses, diamonds and stars (basal melting data are from radar and ice core measurements).

The white curves outline the ice sheet and coastal margins

**Рис. 3. Прогнозируемый геотермальный поток (GF) на глубине 5 км под поверхностью Гренландии (с разрешения доктора И. Рогожиной [32])**

GF был скорректирован для подсчета геотермальных характеристик земной коры с помощью параметризации радиогенных источников тепла (см. «Методы» в Rogozhina et al. [32]). Смоделированное тепловое состояние ГИС и литосферы было откалибровано по локальным данным, которые показаны белыми / черными треугольниками, крестами, алмазами и звездами (данные по базальному плавлению взяты из измерений на радаре и в керне льда). Белые кривые очерчивают ледяной покров и береговые окраины



As a sub-product of deep melting effect, it was recognized recently that subglacial ecosystems support considerable methanogenic activities, thus significantly contributing the global methane production as a greenhouse gas [33, 34]. Melting conditions beneath about half of the ice sheet mean that sediments contain liquid water beneath the ice cover [8, 35]. The inferred methane hydrate reservoir beneath the Antarctic Ice Sheet is comparable to that in the Arctic region and could constitute a previously neglected component of the global methane hydrate inventory with a potential to act as a positive feedback on climate warming during ice-sheet wastage [36, 37]. Geological methane, produced largely via thermogenic processes in the deep subsurface, supplements the biogenic component [38]. It may be generated via the thermal breakdown of organic matter and by inorganic synthesis and outgassing from the mantle. The recent discovery that sub-ice-sheet environments are likely to be heated from below in terms of geothermal energy, may accelerate the production of methane. The findings from Ma et al. [33] highlight the effects of temperature and substrate on potential methanogenesis in the subglacial sediment of the Antarctica area, and may help us for a better estimation on its methane production in a changing environment. If substantial methane hydrate and gas were present be-

neath the WAIS, hydrate destabilization during episodes of ice-sheet collapse could act as a positive feedback on global climate change during past and future ice-sheet wastage [37].

This is an observation not a criticism on climate warming theory and simply reflects the essentially reconnaissance nature of most of the work to date on Antarctic thermal activities and our poor knowledge of the Antarctic lithosphere. All of these recent findings of ice melting beneath Antarctica highlight the need for better understanding subglacial geothermal sources, their hydrologic interactions with marine margins, and their possible roles in global climate change. Without considering the parameterization of the subglacial thermodynamics, hydrodynamics and ice dynamics, any model of climate change is incomplete. Before basal conditions can be correctly parameterized, ice-sheet models are not likely able to yield accurate results and evaluations of the impacts of global climate change on sea level rise in terms of ice melting, and analyses will keep flawed. As Kaus [1] reminds us in his comment on the work of Petrunin et al. [10]: “The solid Earth is not a force that can be ignored – it is an active player in surface processes. As we focus our attentions in a warming world on the atmosphere, oceans and glaciers, we must not forget the planet itself knocking on the surface from below”.

#### References

1. Kaus BJP. Heating glaciers from below. *Nature Geosciences*. 2013;6:683–884.
2. Mercer JH. West Antarctic ice sheet and CO<sub>2</sub> greenhouse effect: a threat of disaster. *Nature*. 1978;271:321–325.
3. IPCC. *Climate Change 2014: Synthesis Report. Contribution of Working Groups I, II and III to the Fifth Assessment Report of the Intergovernmental Panel on Climate Change*. Geneva, Switzerland; 2014. 151 p.
4. Blankenship DD, Bell RE, Hodge SM, Brozena JM, Behrendt JC, Finn CA. Active volcanism beneath the West Antarctic Ice Sheet and implications for ice-sheet stability. *Nature*. 1993;361:526–529.
5. Fahnestock M, Abdalati W, Joughin I, Brozena J, Gogineni P. High geothermal heat flow, basal melt, and the origin of rapid ice flow in central Greenland. *Science*. 2001;294:2338–2342.
6. Bennett MR. Ice streams as the arteries of an ice sheet: their mechanics, stability and significance. *Earth-Science Reviews*. 2003;61(3-4):309–339.
7. Engelhardt H. Ice temperature and high geothermal flux at Siple Dome, West Antarctica, from borehole measurements. *Journal of Glaciology*. 2004;50(169):251–256.
8. Maule CF, Purucker ME, Olsen N, Mosegaard K. Heat flux anomalies in Antarctica revealed by satellite magnetic data. *Science*. 2005;309:464–467.
9. Gramling CA. Tiny window opens into Lake Vostok, while a vast continent awaits. *Science*. 2012;335:789–788. <https://doi.org/10.1126/science.335.6070.788>.
10. Petrunin AG, Rogozhina I, Vaughan APM. Heat flux variations beneath central Greenland's ice due to anomalously thin lithosphere. *Nature Geoscience*. 2013;6:746–750.



11. Schroeder DM, Blankenshi DD, Young DA, Quartini E. Evidence for elevated and spatially variable geothermal flux beneath the West Antarctic ice sheet. *Proceedings of the National Academy of Sciences of the United States of America*. 2014;111(25):9070–9072.
12. Fisher AT, Mankoff KD, Tulaczyk SM, Tyler SW, Foley N, the WISSARD Science Team. High geothermal heat flux measured below the West Antarctic Ice Sheet. *Science Advances*. 2015;1(6):e1500093.
13. Khan AA. Why would sea-level rise for global warming and polar ice-melt? *Geoscience Frontiers*. 2019;10:481–494.
14. Howat IM, Porter C, Smith BE, Noh MJ, Morin P. The reference elevation model of Antarctica. *The Cryosphere*. 2019;13:665–674.
15. Tang CA, Li SZ. The Earth evolution as a thermal system. *Geological Journal*. 2016;51(S1):652–668.
16. Liu J. *China confirms the existence of the World's largest canyon in the South Pole*. 2016. Available from: [http://english.cas.cn/newsroom/china\\_research/201601/t20160120\\_158955.shtml](http://english.cas.cn/newsroom/china_research/201601/t20160120_158955.shtml)
17. Sieminski A, Debayle E, Lévêque JJ. Seismic evidence for deep low-velocity anomalies in the transition zone beneath West Antarctica. *Earth and Planetary Science Letters*. 2003;216(4):645–661.
18. Raymond CF. Energy balance of ice streams. *Journal of Glaciology*. 2000;46(155):665–674.
19. The KamLAND Collaboration. Partial radiogenic heat model for Earth revealed by geoneutrino measurements. *Nature Geoscience*. 2011;4:547–651.
20. Vries MVWD, Bingham RG, Hein AS. A new volcanic province: an inventory of subglacial volcanoes in West Antarctica. In: Siegert MJ, Jamieson SSR, White DA (eds.). *Exploration of Subsurface Antarctica: Uncovering Past Changes and Modern Processes*. Geological Society. London; 2017, vol. 461, p.231–248.
21. Weaver SD. Volcanoes of the Antarctic plate and southern oceans. *Journal of Volcanology and Geothermal Research*. 1991;47(3-4):368–369.
22. Lough AC, Wiens DA, Barcheck CG, Anandakrishnan S, Aster RC, Blankenship DD, Huerta AD, Nyblade A, Young DA, Wilson TJ. Seismic detection of an active subglacial magmatic complex in Marie Byrd Land, Antarctica. *Nature Geoscience*. 2013;6(12):1031–1035.
23. Loose B, Garabato ACN, Schlosser P, Jenkins WJ, Vaughan D, Heywood KJ. Evidence of an active volcanic heat source beneath the Pine Island Glacier. *Nature Communication*. 2018;9:2431.
24. Iverson NA, Lieb-Lappen R, Dunbar NW, Obbard R, Kim E, Golden E. The first physical evidence of subglacial volcanism under the West Antarctic Ice Sheet. *Science Reports*. 2017;7(1):11457.
25. Joughin I, Tulaczyk S. Positive mass balance of the Ross Ice Streams, West Antarctica. *Science*. 2002;295:476–480.
26. Winberry J, Anandakrishnan S. Crustal structure of the West Antarctic rift system and Marie Byrd Land hotspot. *Geology*. 2004;32(11):977–980.
27. Hulbe CL, MacAyeal DR. A new numerical model of coupled inland ice sheet, ice stream, and ice shelf flow and its application to the West Antarctic Ice Sheet. *Journal of Geophysical Research*. 1999;104:349–366.
28. Behrendt JC, LeMasurier WE, Cooper AK, Tessensohn F, Tréhu A, Damaske D. Geophysical studies of the West Antarctic rift system. *Tectonics*. 1991;10:1257–1273.
29. Seroussi H, Ivins ER, Wiens DA, Bondzio J. Influence of a West Antarctic mantle plume on ice sheet basal conditions. *Journal of Geographical Research-Solid Earth*. 2017;122:7127–7155.
30. Jamieson SSR, Ross N, Greenbaum JS, Young DA, Aitken ARA, Roberts JL, Blankenship DD, Bo S, Siegert MJ. An extensive subglacial lake and canyon system in Princess Elizabeth Land, East Antarctica. *Geology*. 2016;44(2):87–90.
31. Bingham RG, Ferraccioli F, King EC. Inland thinning of West Antarctic Ice Sheet steered along subglacial rifts. *Nature*. 2012;487:468–471.
32. Rogozhina I, Petrunin AG, Vaughan APM. Melting at the base of the Greenland ice sheet explained by Iceland hotspot history. *Nature Geoscience*. 2016;9(5):366–369.
33. Ma H, Yan W, Xiao X, Shi G, Li Y, Sun B, Dou Y, Zhang Y. Ex situ culturing experiments revealed psychrophilic hydrogentrophic methanogenesis being the potential dominant methane-producing pathway in subglacial sediment in Larsemann Hills, Antarctic. *Frontiers in Microbiology*. 2018;9:237. <https://doi.org/10.3389/fmicb.2018.00237>.
34. Conrad R. Control of microbial methane production in wetland rice fields. *Nutrient Cycling in Agroecosystems*. 2002;64:59–69.
35. Pattyn F. Antarctic subglacial conditions inferred from a hybrid ice sheet/ice stream model. *Earth and Planetary Science Letters*. 2010;295:451–461.
36. Koven CD, Ringeval B, Friedlingstein P, Ciais P, Cadule P, Khvorostyanov D, Krinner G, Tarnocai C. Permafrost carbon-climate feedbacks accelerate global warming. *Proceedings of the National Academy of Sciences of the United States of America*. 2011;108(36):14769–14774.
37. Wadham JL, Arndt S, Tulaczyk S. Potential methane reservoirs beneath Antarctica. *Nature*. 2012;488:633–637.
38. Archer D. Methane hydrate stability and anthropogenic climate change. *Biogeosciences*. 2007;4:521–544.



## Библиографический список

1. Kaus B.J.P. Heating glaciers from below. *Nature Geosciences*. 2013. Vol. 6. P. 683–884.
2. Mercer J.H. West Antarctic ice sheet and CO<sub>2</sub> greenhouse effect: a threat of disaster. *Nature*. 1978. Vol. 271. P. 321–325.
3. IPCC. *Climate Change 2014: Synthesis Report. Contribution of Working Groups I, II and III to the Fifth Assessment Report of the Intergovernmental Panel on Climate Change*. Geneva, Switzerland, 2014. 151 p.
4. Blankenship D.D., Bell R.E., Hodge S.M., Brozena J.M., Behrendt J.C., Finn C.A. Active volcanism beneath the West Antarctic Ice Sheet and implications for ice-sheet stability. *Nature*. 1993. Vol. 361. P. 526–529.
5. Fahnstock M., Abdalati W., Joughin I., Brozena J., Gogineni P. High geothermal heat flow, basal melt, and the origin of rapid ice flow in central Greenland. *Science*. 2001. Vol. 294. P. 2338–2342.
6. Bennett M.R. Ice streams as the arteries of an ice sheet: their mechanics, stability and significance. *Earth-Science Reviews*. 2003. Vol. 61 (3-4). P. 309–339.
7. Engelhardt H. Ice temperature and high geothermal flux at Siple Dome, West Antarctica, from borehole measurements. *Journal of Glaciology*. 2004. Vol. 50 (169). P. 251–256.
8. Maule C.F., Purucker M.E., Olsen N., Mosegaard K. Heat flux anomalies in Antarctica revealed by satellite magnetic data. *Science*. 2005. Vol. 309. P. 464–467.
9. Gramling C.A. Tiny window opens into Lake Vostok, while a vast continent awaits. *Science*. 2012. Vol. 335. P. 789–788. <https://doi.org/10.1126/science.335.6070.788>.
10. Petrunin A.G., Rogozhina I., Vaughan A.P.M. Heat flux variations beneath central Greenland's ice due to anomalously thin lithosphere. *Nature Geoscience*. 2013. Vol. 6. P. 746–750.
11. Schroeder D.M., Blankenship D.D., Young D.A., Quartini E. Evidence for elevated and spatially variable geothermal flux beneath the West Antarctic ice sheet. *Proceedings of the National Academy of Sciences of the United States of America*. 2014. Vol. 111 (25). P. 9070–9072.
12. Fisher A.T., Mankoff K.D., Tulaczyk S.M., Tyler S.W., Foley N., the WISSARD Science Team. High geothermal heat flux measured below the West Antarctic Ice Sheet. *Science Advances*. 2015. Vol. 1 (6). P. e1500093.
13. Khan A.A. Why would sea-level rise for global warming and polar ice-melt? *Geoscience Frontiers*. 2019. Vol. 10. P. 481–494.
14. Howat I.M., Porter C., Smith B.E., Noh M.J., Morin P. The reference elevation model of Antarctica. *The Cryosphere*. 2019. Vol. 13. P. 665–674.
15. Tang C.A., Li S.Z. The Earth evolution as a thermal system. *Geological Journal*. 2016. Vol. 51 (S1). P. 652–668.
16. Liu J. China confirms the existence of the World's largest canyon in the South Pole. 2016. [Электронный ресурс]. URL: [http://english.cas.cn/newsroom/china\\_research/201601/t20160120\\_158955.shtml](http://english.cas.cn/newsroom/china_research/201601/t20160120_158955.shtml)
17. Sieminski A., Debayle E., L ev eque J.J. Seismic evidence for deep low-velocity anomalies in the transition zone beneath West Antarctica. *Earth and Planetary Science Letters*. 2003. Vol. 216 (4). P. 645–661.
18. Raymond C.F. Energy balance of ice streams. *Journal of Glaciology*. 2000. Vol. 46 (155). P. 665–674.
19. The KamLAND Collaboration. Partial radiogenic heat model for Earth revealed by geoneutrino measurements. *Nature Geoscience*. 2011. Vol. 4. P. 547–651.
20. Vries M.V.W.D., Bingham R.G., Hein A.S. A new volcanic province: an inventory of subglacial volcanoes in West Antarctica // *Exploration of Sub-surface Antarctica: Uncovering Past Changes and Modern Processes* / eds. M.J. Siegert, S.S.R. Jamieson, D.A. White. Geological Society. London, 2017. Vol. 461. P. 231–248.
21. Weaver S.D. Volcanoes of the Antarctic plate and southern oceans. *Journal of Volcanology and Geothermal Research*. 1991. Vol. 47 (3-4). P. 368–369.
22. Lough A.C., Wiens D.A., Barcheck C.G., Anandkrishnan S., Aster R.C., Blankenship D.D., Huerta A.D., Nyblade A., Young D.A., Wilson T.J. Seismic detection of an active subglacial magmatic complex in Marie Byrd Land, Antarctica. *Nature Geoscience*. 2013. Vol. 6 (12). P. 1031–1035.
23. Loose B., Garabato A.C.N., Schlosser P., Jenkins W.J., Vaughan D., Heywood K.J. Evidence of an active volcanic heat source beneath the Pine Island Glacier. *Nature Communication*. 2018. Vol. 9. P. 2431.
24. Iverson N.A., Lieb-Lappen R., Dunbar N.W., Obbard R., Kim E., Golden E. The first physical evidence of subglacial volcanism under the West Antarctic Ice Sheet. *Science Reports*. 2017. Vol. 7 (1). P. 11457.
25. Joughin I., Tulaczyk S. Positive mass balance of the Ross Ice Streams, West Antarctica. *Science*. 2002. Vol. 295. P. 476–480.
26. Winberry J., Anandkrishnan S. Crustal structure of the West Antarctic rift system and Marie Byrd Land hotspot. *Geology*. 2004. Vol. 32 (11). P. 977–980.
27. Hulbe C.L., MacAyeal D.R. A new numerical model of coupled inland ice sheet, ice stream, and ice shelf flow and its application to the West Antarctic Ice Sheet. *Journal of Geophysical Research*. 1999. Vol. 104. P. 349–366.



28. Behrendt J.C., LeMasurier W.E., Cooper A.K., Tessensohn F., Tréhu A., Damaske D. Geophysical studies of the West Antarctic rift system. *Tectonics*. 1991. Vol. 10. P. 1257–1273.

29. Seroussi H., Ivins E.R., Wiens D.A., Bondzio J. Influence of a West Antarctic mantle plume on ice sheet basal conditions. *Journal of Geographical Research-Solid Earth*. 2017. Vol. 122. P. 7127–7155.

30. Jamieson S.S.R., Ross N., Greenbaum J.S., Young D.A., Aitken A.R.A., Roberts J.L., Blankenship D.D., Bo S., Siegert M.J. An extensive subglacial lake and canyon system in Princess Elizabeth Land, East Antarctica. *Geology*. 2016. Vol. 44 (2). P. 87–90.

31. Bingham R.G., Ferraccioli F., King E.C. Inland thinning of West Antarctic Ice Sheet steered along subglacial rifts. *Nature*. 2012. Vol. 487. P. 468–471.

32. Rogozhina I., Petrunin A.G., Vaughan A.P.M. Melting at the base of the Greenland ice sheet explained by Iceland hotspot history. *Nature Geoscience*. 2016. Vol. 9 (5). P. 366–369.

33. Ma H., Yan W., Xiao X., Shi G., Li Y., Sun B., Dou Y., Zhang Y. Ex situ culturing experiments revealed psychrophilic hydrogentrophic

methanogenesis being the potential dominant methane-producing pathway in subglacial sediment in Larsemann Hills, Antarctic. *Frontiers in Microbiology*. 2018. Vol. 9. P. 237. <https://doi.org/10.3389/fmicb.2018.00237>.

34. Conrad R. Control of microbial methane production in wetland rice fields. *Nutrient Cycling in Agroecosystems*. 2002. Vol. 64. P. 59–69.

35. Pattyn F. Antarctic subglacial conditions inferred from a hybrid ice sheet/ice stream model. *Earth and Planetary Science Letters*. 2010. Vol. 295. P. 451–461.

36. Koven C.D., Ringeval B., Friedlingstein P., Ciais P., Cadule P., Khvorostyanov D., Krinner G., Tarnocai C. Permafrost carbon-climate feedbacks accelerate global warming. *Proceedings of the National Academy of Sciences of the United States of America*. 2011. Vol. 108 (36). P. 14769–14774.

37. Wadham J.L., Arndt S., Tulaczyk S. Potential methane reservoirs beneath Antarctica. *Nature*. 2012. Vol. 488. P. 633–637.

38. Archer D. Methane hydrate stability and anthropogenic climate change. *Biogeosciences*. 2007. Vol. 4. P. 521–544.

#### Authorship criteria / Критерии авторства

Chunan Tang, Tiantian Chen, Bin Gong are the authors of the article, hold equal copyright and bear equal responsibility for plagiarism.

Хунан Тан, Тиантиан Чен, Бин Гон написали статью, имеют равные авторские права и несут одинаковую ответственность за плагиат.

#### Responsibility for plagiarism / Конфликт интересов

The authors declare that there is no conflict of interests regarding the publication of this article.

Авторы заявляют об отсутствии конфликта интересов.

#### Information about the authors / Сведения об авторах

##### Chunan Tang,

State Key Laboratory of Geological Processes and Mineral Resources,  
China University of Geosciences (Wuhan),  
Wuhan, China,

State Key Laboratory of Coastal & Offshore Engineering,  
Dalian University of Technology,  
Dalian, China,

✉ e-mail: tca@mail.neu.edu.cn

##### Хунан Тан,

ведущая государственная лаборатория геологических процессов и минеральных ресурсов,  
Китайский геологический университет (Ухань),  
Ухань, Китай,

ведущая государственная лаборатория прибрежной и морской инженерии,  
Даляньский технологический университет,  
Далянь, Китай,

✉ e-mail: tca@mail.neu.edu.cn

**Tiantian Chen,**

School of Civil and Resources Engineering,  
Northeastern University,  
Shenyang, China.

**Тиантиан Чен,**

Школа гражданской и ресурсной инженерии,  
Северо-Восточный университет,  
Шеньян, Китай.

**Bin Gong,**

State Key Laboratory of Coastal & Offshore Engineering,  
Dalian University of Technology,  
Dalian, China.

**Бин Гон,**

ведущая государственная лаборатория прибрежной и морской инженерии,  
Даляньский технологический университет,  
Далянь, Китай.



**Dr. Tang**, as a Chair Professor (funded by Cheung Kong Scholar Programme from State Education Ministry), is the Director of the Deep Underground Research Center (DURC) of Dalian University of Technology, and the Chief Professor at China University of Geosciences (Wuhan), China. He is also the Vice President of the Chinese Society of Rock Mechanics and Engineering CSRME, and was the China National Group Chairman of International Society of Rock Mechanics. In 1984, he started his Ph.D research, in Northeastern University, Shenyang, P.R.China, and got his Ph.D in 1988. In 1991, he continued his post-doctoral work in Imperial College, London, UK. Then, as an academic visitor, he had lots of experience working in Canada, Sweden, Singapore, Switzerland and Hong Kong.

He leads several major research projects in rock mechanics, especially on rock failure process analysis and monitoring in civil engineering, and is the chief scientist for a National 973 program for fundamental research. So far, he has published more than 300 technical papers on rock failure mechanisms and civil engineering, and is the author of five Chinese books of rock mechanics and the principle author of "Rock Failure Mechanism" published by CRC (Taylor & Francis Group, 2010, UK).

**Доктор Тан**, профессор кафедры (финансируется из программы Cheung Kong Scholar Министерства образования), является директором Центра глубинных подземных исследований (DURC) Даляньского технологического университета и ведущим профессором Китайского геологического университета (Ухань), Китай, вице-президентом Китайского общества механики горных пород и машиностроения CSRME, являлся председателем Китайской национальной группы Международного общества механиков горных пород. В 1984 году он начал писать свою докторскую диссертацию в Северо-Восточном университете, Шеньян, Китай, где и получил докторскую степень в 1988 году. В 1991 году он продолжил свою докторскую работу в Имперском колледже, Лондон, Великобритания. Затем в качестве гостя-академика он получил большой опыт работы в Канаде, Швеции, Сингапуре, Швейцарии и Гонконге. Он возглавляет несколько крупных исследовательских проектов в области механики горных пород, особенно в области анализа и мониторинга процессов разрушения горных пород в строительстве, и является главным научным сотрудником Национальной программы фундаментальных исследований 973. На сегодняшний день он опубликовал более 300 технических статей о механизмах разрушения горных пород и строительстве, а также является автором пяти китайских книг по механике горных пород и основным автором книги «Механизм разрушения горных пород», опубликованной CRC (Taylor & Francis Group, 2010 г., Великобритания).



Оригинальная статья / Original article  
УДК 504.054

## Геоэкологическая оценка влияния накопленных отходов бывшего мышьяковистого завода поселка Вершино-Дарасунский на объекты окружающей среды

© О.Л. Качор<sup>а</sup>

<sup>а</sup>Иркутский национальный исследовательский технический университет, г. Иркутск, Россия

**Резюме:** В статье рассматривается геоэкологическое состояние территории поселка Вершино-Дарасунский Забайкальского края с целью установления степени его загрязнения, а также бывшей промплощадки мышьяковистого завода мышьяком и тяжелыми металлами. Все аналитические работы проводились в аккредитованной лаборатории Иркутского национального исследовательского технического университета по аттестованным методикам. Объектами исследования являлись природные и техногенные объекты промплощадки бывшего мышьяковистого завода. В работе представлены результаты проведенных исследований по определению содержания мышьяка и тяжелых металлов в остатках разрушенных сооружений завода, грунте промплощадки и в отвалах огарков. Во всех пробах содержание мышьяка и тяжелых металлов превосходит нормативное в десятки и сотни раз. На основании полученных мониторинговых данных была построена карта ореолов распределения содержаний мышьяка на территории поселка Вершино-Дарасунский. Также был рассчитан суммарный показатель загрязнения почвы промплощадки бывшего мышьяковистого завода в поселке Вершино-Дарасунский, равный 553,61, что соответствует категории загрязнения почв «чрезвычайно опасная». В связи с этим возникает острая необходимость проведения реабилитационных мероприятий по ликвидации последствий накопленного экологического ущерба на природно-технологическом комплексе исследуемой территории.

**Ключевые слова:** мышьяк, мониторинг, огарки, грунт, загрязнение, отходы

**Информация о статье:** Дата поступления 17 июля 2019 г.; дата принятия к печати 23 августа 2019 г.; дата онлайн-размещения 30 сентября 2019 г.

**Для цитирования:** Качор О.Л. Геоэкологическая оценка влияния накопленных отходов бывшего мышьяковистого завода поселка Вершино-Дарасунский на объекты окружающей среды. *Науки о Земле и недрапользование*. 2019. Т. 42. № 3. С. 279–286.

## Environmental impact of the accumulated industrial waste: geo-ecological evaluation (a case study of the former arsenic plant, Vershino-Darasunsky settlement)

© Olga L. Kachor<sup>a</sup>

<sup>a</sup>Irkutsk National Research Technical University, Irkutsk, Russia

**Abstract:** The article deals with the geological-and-ecological state of the Vershino-Darasunsky settlement area, Trans-Baikal Territory, with the aim to define the degree of arsenic and heavy metal pollution of the above area and the former arsenic plant site. The analysis using certified methods has been conducted by the accredited laboratory of Irkutsk National Research and Technical University, the research objects being natural and technogenic objects of the former arsenic plant site. The paper presents the results of study on the arsenic and heavy metal content in the ruins of the plant structures, the site soil, and the cinder heaps. The study has shown that the arsenic and heavy metals content in all the samples is several hundred times the norm value. Based on the obtained monitoring data, a map of the arsenic content areal distribution for Vershino-Darasunsky settlement has been drawn. Besides, an aggregate index of soil pollution of the Vershino-Darasunsky are has been calculated. The index value is 553.61, which corresponds to the 'extremely dangerous' pollution category. In this connection, there is an urgent need for rehabilitation measures to eliminate the effect of the accumulated environmental damage caused to the natural-and-technological complex of the study area.

**Keywords:** arsenic, monitoring, cinder, soil, pollution, waste

**Information about the article:** Received July 17, 2019; accepted for publication August 23, 2019; available online September 30, 2019.



**For citation:** Kachor O.L. Environmental impact of the accumulated industrial waste: geo-ecological evaluation (a case study of the former arsenic plant, Vershino-Darasunsky settlement). *Earth Sciences and Subsoil Use*. 2019;42(3):279–286. (In Russ.)

### Введение

В указе Президента Российской Федерации «О Стратегии экологической безопасности Российской Федерации на период до 2025 года» № 176 от 19.04.2017 г. особое внимание уделяется проблеме накопленного экологического ущерба хозяйственной деятельности прошлых лет. В результате проведенного государственного мониторинга к 2018 году выявлено 1800 объектов накопленного вреда окружающей среде в 80 субъектах Российской Федерации с общей площадью загрязненных земель 160 тыс. га и массой накопленных отходов 260 млн т, при этом численность населения, подверженного негативному воздействию, составляет порядка 18 млн чел. Около 6 % этих отходов относится к горно-перерабатывающей промышленности. Особое внимание уделяется отходам горно-перерабатывающей промышленности, содержащим мышьяк, которые могут очень долгое время оставаться активными, то есть способными к химическим превращениям и миграции под действием естественных природных условий, а также попадают в цепь жизнеобеспечения человека: пищу, воду и воздух [1–6].

В настоящее время территорий с еще не ликвидированными очагами загрязнения прошлых лет по добыче арсенопиритных руд и производству мышьяка в стране остается по-прежнему много, наиболее представительными территориями являются город Свирск, поселки Вершино-Дарасунский и Запокровский, города Карабаш, Пласт и Ревда – здесь предельно допустимые концентрации мышьяка и тяжелых металлов в почвах превышены в десятки и сотни раз, а частота онкологических и иных мышьякопосредованных заболеваний местного населения всегда превышает среднее по региону [7–9]. Из обозначенных территорий наиболее острая социально-экологи-

ческая ситуация с мышьяковистым загрязнением объектов окружающей среды представлена в поселке Вершино-Дарасунский Забайкальского края ввиду расположения промплощадки бывшего мышьяковистого завода в центральной части населенного пункта вблизи многих социально значимых объектов, а также в соседстве с действующими цехами золотодобывающей фабрики. Мышьяковистый завод в Вершино-Дарасунском был построен в 30-х годах XX столетия для производства белого мышьяка, закрыт в 1973 году без проведения каких-либо работ по безопасной ликвидации его сооружений, мышьяксодержащих огарков и загрязненного грунта. К настоящему времени на территории промплощадки расположены остатки здания основного цеха, трехэтажный цех рафинации мышьяка, на кулерах которого и под ними можно наблюдать полупродукты возгонки триоксида мышьяка – вкрапления белосерого цвета, а также огарки обжига арсенопиритных руд общей массой около 50,0 тыс. т.

Целью исследований являлось установление степени загрязнения территории поселка и бывшей промплощадки мышьяковистого завода мышьяком и тяжелыми металлами. Для этого нами были проведены соответствующие полевые и химико-аналитические исследования.

### Методы исследования

Все анализы проводились в аккредитованной лаборатории экологического мониторинга природных и техногенных сред Иркутского национального исследовательского технического университета № РОСС RU.0001.518897. Для получения результатов исследования были использованы следующие аттестованные методики: ПНД Ф 16.1:2.3:3.11-98. Методика выполнения измерений содержания металлов в твердых объектах методом спектрометрии с индуктивно-связанной плазмой; ПНД Ф 16.1:2.3:3.50-08. Мето-



дика выполнения измерений массовых долей подвижных форм металлов в почвах, отходах, компостах, кеках, осадках сточных вод атомно-эмиссионным методом с атомизацией в индуктивно-связанной аргоновой плазме.

### Результаты исследования и их анализ

Для определения содержания мышьяка и тяжелых металлов в природных и техногенных объектах на бывшей промплощадке мышьяковистого завода (рис. 1) и в селитебной зоне поселка Вершино-Дарасунский в октябре 2016 года были отобраны пробы природного и техногенного происхождения, также были отобраны пробы грунта на расстоянии 50 км от поселка Вершино-Дарасунский при выезде на федеральную автомобильную трассу Р-297 «Амур» для определения фонового содержания элементов в рассматриваемом районе.

Во всех пробах содержание мышьяка и тяжелых металлов значительно превосходит нормативное. Так, по мышьяку (ориентировочно допустимая концентрация (ОДК) – 2 мг/кг для песчаных и су-

песчаных почв) зафиксированы превышения в пробах грунта от 500 до 75000 раз, до нескольких сотен раз достигает превышение содержания по тяжелым металлам. Максимальное превышение по свинцу составляет 250 раз (ОДК – 32 мг/кг), по меди – в 80 раз (ОДК – 33 мг/кг), по цинку – в 14 раз (ОДК – 55 мг/кг) [10]. Содержание мышьяка в отвалах огарков варьируется от 2820 до 20890 мг/кг, в остатках разрушенных сооружений (кирпич) – от 335 до 1680 мг/кг. Самые значительные концентрации мышьяка зафиксированы в пробах грунта, отобранных по периметру цеха рафинации – 159770 мг/кг. Это говорит о привнесении высоких концентраций загрязнителя как ввиду негерметичности помещений во время работы завода, так и по причине выдувания остатков готовой продукции (триоксида мышьяка) с кулеров после остановки производства и постепенного разрушения цеха. Такие содержания мышьяка и тяжелых металлов в грунте свидетельствуют о его крупномасштабном загрязнении и характеризуют его как отход [11].



**Рис. 1. Космическая съемка (Яндекс-карты) места расположения бывшей промплощадки мышьяковистого завода и места размещения огарков:**  
1 – условные границы бывшей промплощадки в поселке Вершино-Дарасунский;  
2 – строения ООО «Урюмкан» (золотоизвлекательной фабрики), 2016 г.

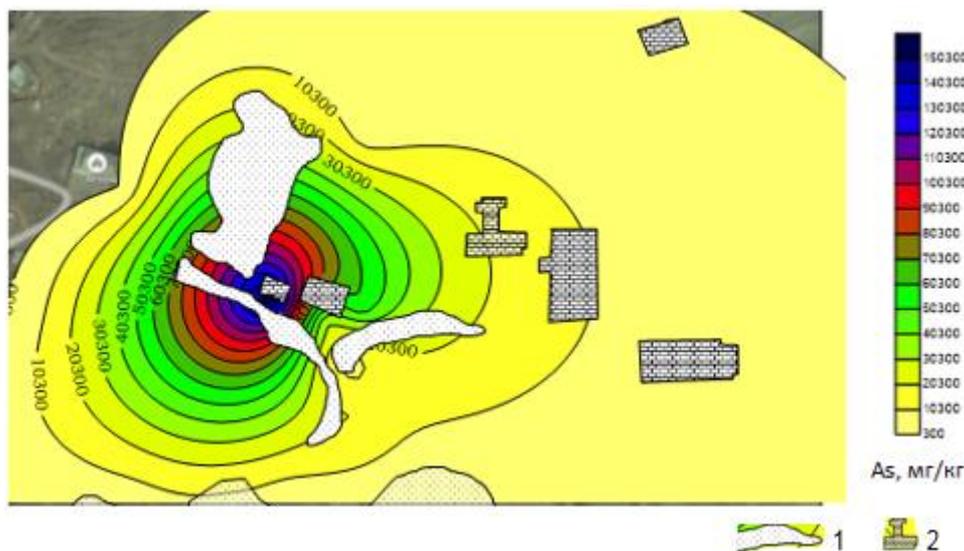
**Fig. 1. Space imagery (Yandex maps) of the former arsenic plant site and the cinder heaps location:**  
1 – approximate boundaries of the former industrial site in Vershino-Darasunsky settlement;  
2 – "Uryumkan" (gold extraction factory) structures, 2016



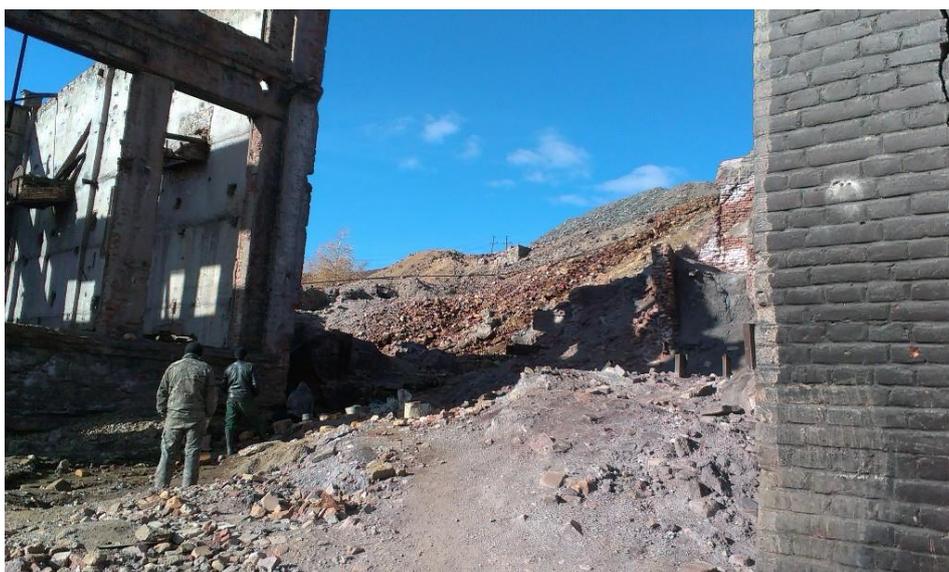
На основании полученных данных в картографическом редакторе Surfer была построена карта ореолов рассеяния мышьяка на территории поселка Вершино-Дарасунский (рис. 2) [12]. Как видно из рис. 2, основное экстремальное содержание мышьяка находится рядом с бывшими производственными цехами. На этой территории и фиксируются наиболь-

шие превышения ОДК по мышьяку в почве. Концентрированию мышьяка на этой территории способствует рельеф местности – уклон в сторону промплощадки бывшего мышьяковистого завода (рис. 3).

Площадь зоны с превышением ОДК по мышьяку в грунте более чем в 5000 раз составляет около 9 га. В поселке



**Рис. 2. Ореолы распределения содержаний мышьяка на территории природно-техногенного комплекса бывшего мышьяковистого завода в поселке Вершино-Дарасунский:**  
1 – условные границы отвалов огарков; 2 – строения  
**Fig. 2. Arsenic content areal distribution in the natural-technogenic complex of the former arsenic plant area, Vershino-Darasunsky settlement:**  
1 – conditional boundaries of the cinder dumps; 2 – buildings



**Рис. 3. Вид на заброшенную промплощадку завода (поселок Вершино-Дарасунский), 2016 г.**  
**Fig. 3. View of the abandoned industrial site of the plant (Vershino-Darasunsky settlement), 2016**



преобладает западный ветер, что объясняет распространение ореола загрязнения в восточном направлении. Понижение рельефа местности (см. рис. 3) в сторону местоположения развалин основных цехов мышьяковистого завода за много лет способствовало образованию локального участка с катастрофическим превышением содержания мышьяка. По этой территории (см. рис. 3) с северной части промплощадки золотоизвлекательной фабрики между отвалами огарков протекает ручей, который вымывает из отходов и несет в себе вниз по склону не только золото, незаконно добывающееся местным населением поселка, но также мышьяк и тяжелые металлы.

Для установления миграционной способности мышьяка из отходов в объекты окружающей среды были проведены исследования по определению его подвижных форм. Именно подвижные формы мышьяка и тяжелых металлов представляют особую социально-экологическую опасность для населения и объектов окружающей среды [13–15]. Попадая в водную среду, они легко мигрируют в грунты, в подземные водооток, распространяясь далеко от источника загрязнения [16–20]. Учитывая, что процесс естественного вымывания мышьяка из отходов длится уже более 80 лет, можно говорить о глубокой степени проникновения мышьяка в пористые структуры материалов отходов и образовании с их элементами различных форм связей как химической, так и физической природы. По результатам исследований наиболее процентное содержание миграционных форм наблюдалось в остатках разрушенных сооружений (кирпичах) и превышало 23 %, в верхнем слое отвалов огарков подвижные формы мышьяка составляют порядка 2,4 %. Низкий процент отмытого мышьяка из отвалов огарков говорит о том, что за длительный период мышьяк вымылся из верхних слоев огарков, проникая вглубь толщи отвала, а затем в подстилающую поверхность.

## Обсуждение

На основании полученных мониторинговых данных о валовом содержании мышьяка и тяжелых металлов был рассчитан суммарный показатель загрязнения почвы промплощадки бывшего мышьяковистого завода в поселке Вершино-Дарасунский. Суммарный показатель загрязнения ( $Z_c$ ) почвы равен 553,61, что согласно методике «Оценка почв и грунтов в ходе проведения инженерно-экологических изысканий для строительства» оценивается как очень загрязненный, а категория загрязнения почв – как чрезвычайно опасная.

Согласно санитарно-эпидемиологическим требованиям к качеству почвы «Санитарно-эпидемиологические правила и нормативы СанПиН 2.1.7.1287-03. Почва, очистка населенных мест, бытовые и промышленные отходы, санитарная охрана почвы», почвенный покров промплощадки поселка Вершино-Дарасунский можно отнести к категории загрязнения «чрезвычайно опасная» ( $128 < Z_c$ ). Рекомендованное использование данного типа грунтов: вывоз и утилизация на специализированных полигонах. При наличии эпидемиологической опасности – использование после проведения дезинфекции (дезинвазии) по предписанию органов госсанэпидслужбы с последующим лабораторным контролем.

## Заключение

Результаты проведенных исследований свидетельствуют о крупномасштабном загрязнении данной территории. Даже при условии ликвидации промплощадки бывшего мышьяковистого завода поселка Вершино-Дарасунский со всеми отходами (огарки, разрушенные сооружения, грунт) оставшая территория населенного пункта остается крайне загрязненной и требует реабилитационных мероприятий по устранению последствий влияния накопленного экологического ущерба на природно-техногенный комплекс изучаемой территории.



## Библиографический список

1. Богданов А.В., Качор О.Л., Федотов К.В., Чайка Н.В. Ликвидация последствий деятельности мышьякового производства горно-перерабатывающей промышленности // Экология и промышленность России. 2014. № 5. С. 31–35.
2. McCarty K.M., Hanh H.T., Kim K.W. Arsenic geochemistry and human health in South East Asia // Reviews on Environmental Health. 2011. Vol. 26. Iss. 1. P. 71–78. <https://doi.org/10.1515/reveh.2011.010>.
3. Smith E., Naidu R., Alston A.M. Arsenic in the soil environment: a review // Advances in Agronomy. 1998. Vol. 64. P. 149–195.
4. Водяницкий Ю.Н. Оценка суммарной токсикологической загрязненности почв тяжелыми металлами и металлоидами // Агрехимия. 2017. № 2. С. 56–63.
5. Kumpiene J., Desogus P., Schulenburg S., Arenella M., Renella G., Brännvall E. [et al.]. Utilisation of chemically stabilized arsenic-contaminated soil in a land fill cover // Environmental Science and Pollution Research. 2013. Vol. 20. Iss. 12. P. 8649–8662. <https://doi.org/10.1007/s11356-013-1818-3>.
6. Keller C., Kayser A., Schulin R. Heavy-metal uptake by agricultural crops from sewage sludge treated soils of the Upper Swiss Rhine Valley and the effect of time // Environmental restoration of metals-contaminated soils. Washington: Lewis, 2001. P. 273–293.
7. Петров И.М., Вольфсон И.Ф., Петрова А.И. Выбросы мышьяка металлургическими заводами России и их влияния на состояние окружающей среды и здоровье населения // Экологический вестник России. 2014. № 12. С. 44–49.
8. Ульрих Д.В., Тимофеева С.С. Современное состояние хвостохранилища в г. Карабаш и его влияние на техногенез прилегающей территории // Экология и промышленность России. 2015. Т. 19. № 1. С. 56–59.
9. Макушев Д.Ю. Воздействие выбросов ОАО «Среднеуральский медеплавильный завод» на воздушный бассейн // Известия Уральского государственного горного университета. 2011. № 25-26. С. 53–58.
10. Качор О.Л., Богданов А.В., Федотов К.В. Оценка правовой и технической возможности ликвидации накопленного вреда окружающей среде мышьяковистыми отходами горно-перерабатывающей промышленности // Экология и промышленность России. 2017. Т. 21. № 11. С. 42–46.
11. Мязин В.П., Михайлютина С.И. Комплексная оценка техногенного загрязнения почв и продуктов питания тяжелыми металлами при размещении хвостохранилищ в Восточном Забайкалье // Горный информационно-аналитический бюллетень. 2006. № 9. С. 164–170.
12. Toth G., Hermann T., Szatmari G., Pasztor L. Maps of heavy metals in the soils of the European Union and proposed priority areas for detailed assessment // Science of the Total Environment. 2016. Vol. 565. P. 1054–1062.
13. Harvey C.F., Swartz C.H., Badruzaman A.B.M., Keon-Blute N., Yu W., Ali M.A. [et al.]. Arsenic Mobility and Groundwater Extraction in Bangladesh // Science. 2002. Vol. 298. Iss. 5598. P. 1602–1606.
14. Shrivastava A., Ghosh D., Dash A., Bose S. Arsenic contamination in soil and sediment in India: Sources, effects, and remediation // Current Pollution Reports. 2015. Vol. 1. Iss. 1. P. 35–46.
15. Добровольский В.В. Миграционные формы и миграция масс тяжелых металлов в биосфере // Геохимия природных и техногенно измененных биогеосистем. М.: Научный мир, 2006. С. 35–54.
16. Птицын А.Б., Гребенщикова В.И., Заман Л.В., Итигилова М.Ц., Матюгина Е.Б., Смирнова О.К. [и др.]. Подвижность химических элементов в водных и наземных экосистемах // Вестник Забайкальского государственного университета. 2014. № 8 (111). С. 23–32.
17. Гордеева О.Я., Белоголова Г.А., Гребенщикова В.И. Распределение и миграция тяжелых металлов и мышьяка в системе почва – растение в условиях г. Свирска (Южное Прибайкалье) // Проблемы региональной экологии. 2010. № 3. С. 108–113.
18. Пузанов А.В., Бабошкина С.В., Алексеев И.А., Салтыков А.В. Особенности накопления и распределения тяжелых металлов и мышьяка в системе огородные почвы – овощные культуры в районе строительства космодрома «Восточный» (бассейн р. Зeya, Амурская область) // Агрехимия. 2015. № 2. С. 89–96.
19. Золотарева Б.Н. Миграция и трансформация экзогенных форм соединений тяжелых металлов в почвах (натурное моделирование) // Тяжелые металлы в окружающей среде: материалы международного симпозиума (Пушино, 15–18 октября 1996 г.). Пушино, 1997. С. 35–43.
20. Турбинский В.В., Бортникова С.Б. О соотношении мышьяка и сурьмы в биогеохимических провинциях как факторов риска здоровью // Анализ риска здоровью. 2018. № 3. С. 136–143.

## References

1. Bogdanov AV, Kachor OL, Fedotov KV, Chaika NV. Elimination of the arsenic production effects in mining and processing industry. *Ekologiya i promyshlennost' Rossii = Ecology and Industry of Russia*. 2014;5:31–35. (In Russ.)



2. McCarty KM, Hanh HT, Kim KW. Arsenic geochemistry and human health in South East Asia. *Reviews on Environmental Health*. 2011;26(1):71–78. <https://doi.org/10.1515/reveh.2011.010>.
3. Smith E, Naidu R, Alston AM. Arsenic in the soil environment: a review. *Advances in Agronomy*. 1998;64:149–195.
4. Vodyanitskii YuN. The evaluation of total toxicological contamination of soils with heavy metals and metalloids. *Agrokimiya = Agrochemistry*. 2017;2:56–63. (In Russ.)
5. Kumpiene J, Desogus P, Schulenburg S, Arenella M, Renella G, Brännvall E, et al. Utilisation of chemically stabilized arsenic-contaminated soil in a land fill cover. *Environmental Science and Pollution Research*. 2013;20(12):8649–8662. <https://doi.org/10.1007/s11356-013-1818-3>.
6. Keller C, Kayser A, Schulin R. Heavy-metal uptake by agricultural crops from sewage sludge treated soils of the Upper Swiss Rhine Valley and the effect of time. *Environmental restoration of metals-contaminated soils*. Washington: Lewis; 2001. p.273–293.
7. Petrov IM, Volfson IF, Petrova AI. Arsenic emission from Russian metallurgical plants and its impact on the environment and public health. *Ekologicheskii vestnik Rossii = Environmental Bulletin of Russia*. 2014;12:44–49. (In Russ.)
8. Ul'rikh DV, Timofeeva SS. The current state of the tailing dump in the city of Karabash and its impact on the technogenesis of the adjacent territory. *Ecology and Industry of Russia*. 2015;19(1):56–59. (In Russ.)
9. Makushev DYu. Impact of emissions by JSC "Sredneuralsky copper smelter" on the atmosphere. *News of the Ural State Mining University*. 2011;25-26:53–58. (In Russ.)
10. Kachor OL, Bogdanov AV, Fedotov KV. Legal and technical possibility assessment of eliminating accumulated damage to environment by arsenic waste from mining and processing industry. *Ecology and Industry of Russia*. 2017;21(11):42–46. (In Russ.)
11. Myazin VP, Mikhailyutina SI. Complex assessment of technogenic contamination of soils and food products with heavy metals when allocating tailing dumps in Eastern Trans-Baikal region. *Mining Information and Analytical Bulletin*. 2006;9:164–170. (In Russ.)
12. Toth G, Hermann T, Szatmari G, Pasztor L. Maps of heavy metals in the soils of the European Union and proposed priority areas for detailed assessment. *Science of the Total Environment*. 2016;565:1054–1062.
13. Harvey CF, Swartz CH, Badruzzaman ABM, Keon-Blute N, Yu W, Ali MA, et al. Arsenic Mobility and Groundwater Extraction in Bangladesh. *Science*. 2002;298(5598):1602–1606.
14. Shrivastava A, Ghosh D, Dash A, Bose S. Arsenic contamination in soil and sediment in India: Sources, effects, and remediation. *Current Pollution Reports*. 2015;1(1):35–46.
15. Dobrovol'skii VV. Migration forms and mass migration of heavy metals in the biosphere. *Geochemistry of natural and anthropogenic modified biogeosystems*. Moscow: Nauchnyi mir; 2006. p.35–54. (In Russ.)
16. Ptitsyn AB, Grebenshchikova VI, Zaman LV, Itigilova MTs, Matyugina EB, Smirnova OK, et al. Mobility of chemical elements in aquatic and terrestrial ecosystems. *Vestnik Zabaikal'skogo gosudarstvennogo universiteta = Bulletin of Trans-Baikal state University*. 2014;8(111):23–32. (In Russ.)
17. Gordeeva OYa, Belogolova GA, Grebenshchikova VI. Distribution and migration of heavy metals and arsenic in "soil – plant" system in Svirsk town conditions (the Southern Baikal region). *Problemy regional'noi ekologii = Problems of the Regional Ecology*. 2010;3:108–113. (In Russ.)
18. Puzanov AV, Baboshkina SV, Alekseev IA, Saltykov AV. Accumulation and distribution of heavy metals and arsenic in the "garden soil-vegetable crops" systems near the Vostochny Cosmodrome (Zeya River basin, Amurskaya oblast). *Agrokimiya = Agrochemistry*. 2015;2:89–96. (In Russ.)
19. Zolotareva BN. Migration and transformation of the exogenous forms of heavy metal compounds in soils (field modeling). In: *Tyazhelye metally v okruzhayushchei srede: materialy mezhdunarodnogo simpoziuma = Heavy metals in the environment: Proceedings of the international symposium*, 15–18 October 1996, Pushchino. Pushchino; 1997. p.35–43. (In Russ.)
20. Turbinskii VV, Bortnikova SB. Proportions of arsenic and antimony in biogeochemical provinces as health risk factors. *Health Risk Analysis*. 2018;3:136–143. (In Russ.)

#### Критерии авторства / Authorship criteria

Качор О.Л. написала статью, имеет на нее авторские права и несет ответственность за плагиат.  
Olga L. Kachor is the author of the article, holds the copyright and bears responsibility for plagiarism

#### Конфликт интересов / Responsibility for plagiarism

Автор заявляет об отсутствии конфликта интересов.  
The author declares that there is no conflict of interests regarding the publication of this article.



## Сведения об авторе / Information about the author

**Качор Ольга Леонидовна,**

кандидат технических наук,  
доцент кафедры обогащения полезных ископаемых  
и охраны окружающей среды им. С.Б. Леонова,  
Институт недропользования,  
Иркутский национальный исследовательский технический университет,  
664074, г. Иркутск, ул. Лермонтова, 83, Россия,  
✉ e-mail: [olgakachor@gmail.com](mailto:olgakachor@gmail.com)

**Olga L. Kachor,**

Cand. Sci. (Eng.),  
Associate Professor, Department of Mineral Processing  
and Environmental Protection,  
Institute of Subsoil Use,  
Irkutsk National Research Technical University,  
83, Lermontov St., Irkutsk, 664074, Russia,  
✉ e-mail: [olgakachor@gmail.com](mailto:olgakachor@gmail.com)



Оригинальная статья / Original article  
УДК 55(0.8.055+3.062)

## Комплексная аэрогеофизическая съемка при поисках медно-никелевых объектов на Дальнем Востоке

© М.Г. Пустозеров<sup>а</sup>

<sup>а</sup>ЗАО «Аэрогеофизическая разведка», г. Новосибирск, Россия

**Резюме:** Целью данной статьи является демонстрация возможностей современной аэрогеофизической съемки при поисках промышленно значимых объектов медно-никелевого оруденения различных типов на Дальнем Востоке России. Успешному решению поставленной задачи способствовали использование инновационных технологий съемки и определенные физико-геологические модели оруденения. Комплекс геофизических методов включал магниторазведку, гамма-спектрометрию и зондирование становлением поля. Особенностью комплекса является электроразведочная технология, позволяющая выделять электрические неоднородности размером в несколько десятков метров на глубине в первые сотни метров. Съемка выполнена в масштабе 1:25000 на территории со сложным геологическим строением, где преобладающими являются древние (архейские) породы. Геофизические поля характеризуются чрезвычайно сложным строением, обусловленным продолжительной геологической историей при ярко выраженных тектонических процессах и многообразном магматизме. Для объективной интерпретации и локализации поисковых объектов осуществлен статистический анализ геофизических данных различными способами и выполнена количественная интерпретация магнитного и электрометрического полей в формате 1-3D. По совокупности полученной информации произведено объемное геологическое картирование до глубины 300 м и локализованы рудные объекты различных типов. На площади выделено восемь структурно-вещественных комплексов, включая рудовмещающие основные-ультраосновные и гипербазитовые образования. Отмеченные комплексы формируют два крупных тектонических блока с разной металлогенической обстановкой, обусловленной крупной глубинной интрузией основного состава – источника медно-никелевого оруденения. Разрывные нарушения образуют три системы с резко отличающимися элементами залегания – дорудную, синрудную (рудоконтролирующую) и пострудную. Территория характеризуется широким развитием минерализованных зон разного генезиса и параметров. По специфическим геолого-геофизическим показателям обособлено два рудоконтролирующих комплекса медно-никелевого оруденения – первого (типичного) и второго (метасоматического) типов. Особого рода рудные объекты могут располагаться в отложениях кор выветривания. Собственно рудные объекты локализованы на основе физико-геологических моделей – ассоциации рудоконтролирующих образований со специфическими геофизическими характеристиками. Всего выделено двенадцать перспективных участков, из которых четыре отнесены к первоочередным.

**Ключевые слова:** комплексная аэрогеофизическая съемка, зондирование становлением поля, сульфидное медно-никелевое оруденение, поисковые факторы

**Информация о статье:** Дата поступления 23 мая 2019 г.; дата принятия к печати 30 августа 2019 г.; дата онлайн-размещения 30 сентября 2019 г.

**Для цитирования:** Пустозеров М.Г. Комплексная аэрогеофизическая съемка при поисках медно-никелевых объектов на Дальнем Востоке. *Науки о Земле и недروпользование*. 2019. Т. 42. № 3. С. 287–302.

## Integrated aerogeophysical survey in prospecting for copper-nickel deposits in the Far East of Russia

© Maksim G. Pustozеров<sup>а</sup>

<sup>а</sup>CJSC “Aerogeophysical survey”, Novosibirsk, Russia

**Abstract:** The study aims to demonstrate the capabilities of the modern aerogeophysical survey in prospecting for commercially promising copper-nickel mineralization objects of different types in the Far East of Russia. To realize the aim, innovation survey technologies and physical-geological models of mineralization are used. The set of geophysical methods includes a magnetic survey, gamma-ray spectrometry, and TEM sounding. The key feature of the above set is an electric survey technology that allows registering electrical inhomogeneities of several tens of meters at a depth of the first hundreds of meters. The survey has been conducted on a scale of 1:25 000, for an area of a complex geological structure with prevailing ancient (Archean) rocks. The extremely complex structure of



the geophysical fields is a result of the long geological history with pronounced tectonic processes and diverse magmatism. For objective interpretation and localization of the explored objects, different methods of the statistical analysis of the geophysical data are applied, and quantitative interpretation of the magnetic and electrometric fields in the 1-3D format is performed. Based on the obtained aggregate information, volumetric geological mapping has been conducted (up to a 300 m depth), and ore objects of different types have been localized. Eight structure-substance complexes, including ore-bearing basic-ultrabasic and hyperbasic formations, have been distinguished in the study area. The above complexes form two large tectonic blocks with different metallogenic conditions due to the massive intrusion of the main composition, i.e. the source of copper-nickel mineralization. The faults form three systems with markedly different occurrence elements, i.e. pre-ore, syn-mineral (ore controlling) and post-ore. The area is characterized by widely developed mineralized zones of different genesis. Based on the specific geological and geophysical indicators, two ore-controlling complexes of copper-nickel mineralization have been distinguished, i.e. the first type (typical) and the second type (metasomatic). Based on the physical and geological models, ore objects per se have been localized, i.e. associations of ore-controlling formations with specific geophysical characteristics. In total, 12 promising sites have been localized, of which four have been defined as priority ones.

**Keywords:** integrated aerogeophysical survey, TEM sounding, sulfide copper-nickel mineralization, survey factors

**Information about the article:** Received May 23, 2019; accepted for publication August 30, 2019; available online September 30, 2019.

**For citation:** Pustozеров M.G. Integrated aerogeophysical survey in prospecting for copper-nickel deposits in the Far East of Russia. *Earth Sciences and Subsoil Use*. 2019;42(3):287–302. (In Russ.)

### Введение

В последние годы вследствие технологических прорывов в аппаратурной и методологической областях существенно повысилась эффективность комплексной аэрогеофизической съемки (КАГС) при поисках рудных объектов различных полезных ископаемых. Особенно это касается электроразведочного канала, позволяющего скачкообразно увеличить объем полезной информации при поисковых работах. Аэроэлектроразведка методом зондирования становлением поля – итог многолетнего сотрудничества в области инновационных технологий АО «Сибирский научно-исследовательский институт геологии, геофизики и минерального сырья», ООО «Геофизическое предприятие «Сибгеотех»» и ЗАО «Аэрогеофизическая разведка» – отличается высокой глубиной исследований (до 500 м) при разрешении в первые десятки метров [1–3].

Другой важной составляющей высокой эффективности КАГС является накопление знаний, выразившееся в разработке корректных и апробированных

на многих десятках месторождений физико-геологических моделей поисковых объектов [4–6].

В качестве примера успешного использования КАГС приводятся результаты работ на одной из площадей (500 км<sup>2</sup>) на Дальнем Востоке, перспективной на выявление промышленно значимых медно-никелевых месторождений.

В геологическом строении района исследований принимают участие широко распространенные архейские образования, представленные глубоко метаморфизированными гнейсами, сланцами, кварцитами, амфиболитами, а также юрские (туфы, риолиты, алевролиты, песчаники, конгломераты), неогеновые (пески, глины, галечники) и четвертичные отложения различного состава<sup>1-3</sup>. Интрузивные образования занимают до 30 % площади съемки и представлены несколькими комплексами: позднеархейским (лейкограниты, гранодиориты), протерозойским (гранитоиды), позднепалеозойским (гранодиориты, граниты, кварцевые диориты), раннемеловым (рудоносные мелкие массивы, дайки основного

<sup>1</sup> Геологическая карта СССР. Масштаб 1:200000. Серия Становая. N-52-XIV. М.: Недра, 1965.

<sup>2</sup> Геологическая карта СССР. Масштаб 1:200000. Серия Становая. N-52-XIII. М.: Недра, 1967.

<sup>3</sup> Государственная геологическая карта Российской Федерации. Масштаб 1:1000000 (третье поколение). N-52-3ея. СПб.: Изд-во ВСЕГЕИ, 2007.



и ультраосновного состава). В региональном плане район работ расположен в пределах Станового террейна (складчатого-глыбовой области) на стыке Дамбукинского нижнеархейского и Иликанского верхнеархейского метаморфических блоков, что определило широкое развитие разрывной тектоники различной иерархии и элементов залегания. Формирование раннемелового рудоносного кортландит-пироксенит-габбрового комплекса происходило синхронно с магматическими породами Станового вулканоплутонического пояса в результате коллизии Сибирского кратона и Амурского террейна. Заключительным этапом тектонического развития явились кайнозойские впадины, заполненные неогеновыми и четвертичными отложениями.

Главными полезными ископаемыми на площади считаются медно-никелевые руды. Выявлено несколько рудопроявлений, которые при дальнейшем изучении предполагается перевести в разряд промышленно значимых месторождений магнетита [7]. Генетически руды связываются с раннемеловым комплексом малых интрузий основного-ультраосновного состава. Медно-никелевое оруденение подразделено на три типа: вкрапленные руды в магматических породах преимущественно ультраосновного состава (пироксениты, кортландиты, горблендиты), сплошные (массивные) руды в тектонических зонах, прожилково-вкрапленные руды в экзоконтактах магматических пород. Типичный состав руд по мере убывания представлен рядом «пирротин (доминирующий) – халькопирит – пентландит – магнетит» [8].

#### **Методы исследований**

КАГС, включающая магниторазведку, гамма-спектрометрию и электро-разведку становлением поля, выполнена в масштабе 1:25000 на площади 500 км<sup>2</sup>. Характерной особенностью комплекса является электроразведочный канал с глубиной изучения до 500 м. Разрешение данного метода позволяет выявить электрические неоднородности размером в

несколько десятков метров на глубине в первые сотни метров. Аппаратурный комплекс состоит из внешней платформы с радиусом 10 м и бортового регистрирующего блока. Платформа представляет собой полигональный секционный каркас из композиционных материалов. Вокруг каркаса крепится кабель генераторного контура. Прием полезного сигнала осуществляется датчиком, размещенным в центре платформы (соосная приемно-генераторная схема). Зафиксированный сигнал через антенный усилитель поступает по трос-кабелю на борт вертолета для регистрации бортовой аппаратурой. Технология не имеет аналогов в стране и сопоставима по своим возможностям с лучшими зарубежными образцами. Аппаратурно-методический комплекс «Импульс-А5» разработан и внедрен в практику ЗАО «Аэрогеофизическая разведка» (Россия) совместно с АО «Сибирский научно-исследовательский институт геологии, геофизики и минерального сырья», ООО «Геофизическое предприятие «Сибгеотех»» (Россия). Магниторазведка осуществляется с использованием магнитометра CS-3 (Scintrex LTD, Канада). При проведении гамма-спектрометрии использовались наиболее совершенные цифровые гамма-спектрометры RSX-4 и RSX-5 серии RS-500 на основе сцинтилляционных детекторов (Radiation Solutions Inc., Канада).

КАГС выполнена по серии параллельных маршрутов в меридиональном направлении, вкрест основному простиранию структур. Съёмка произведена с огибанием генеральных форм рельефа на средней высоте 100 м при скорости 100 км/ч. При этом спад электродвижущей силы фиксировался на высоте 50 м, модуль вектора магнитной индукции – на 75 м, а гамма-спектрометрических характеристик – на 100 м. Плановая привязка маршрутов выполнена спутниковой навигационной системой (GPS), обеспечивающей точность определения координат ±10 м.

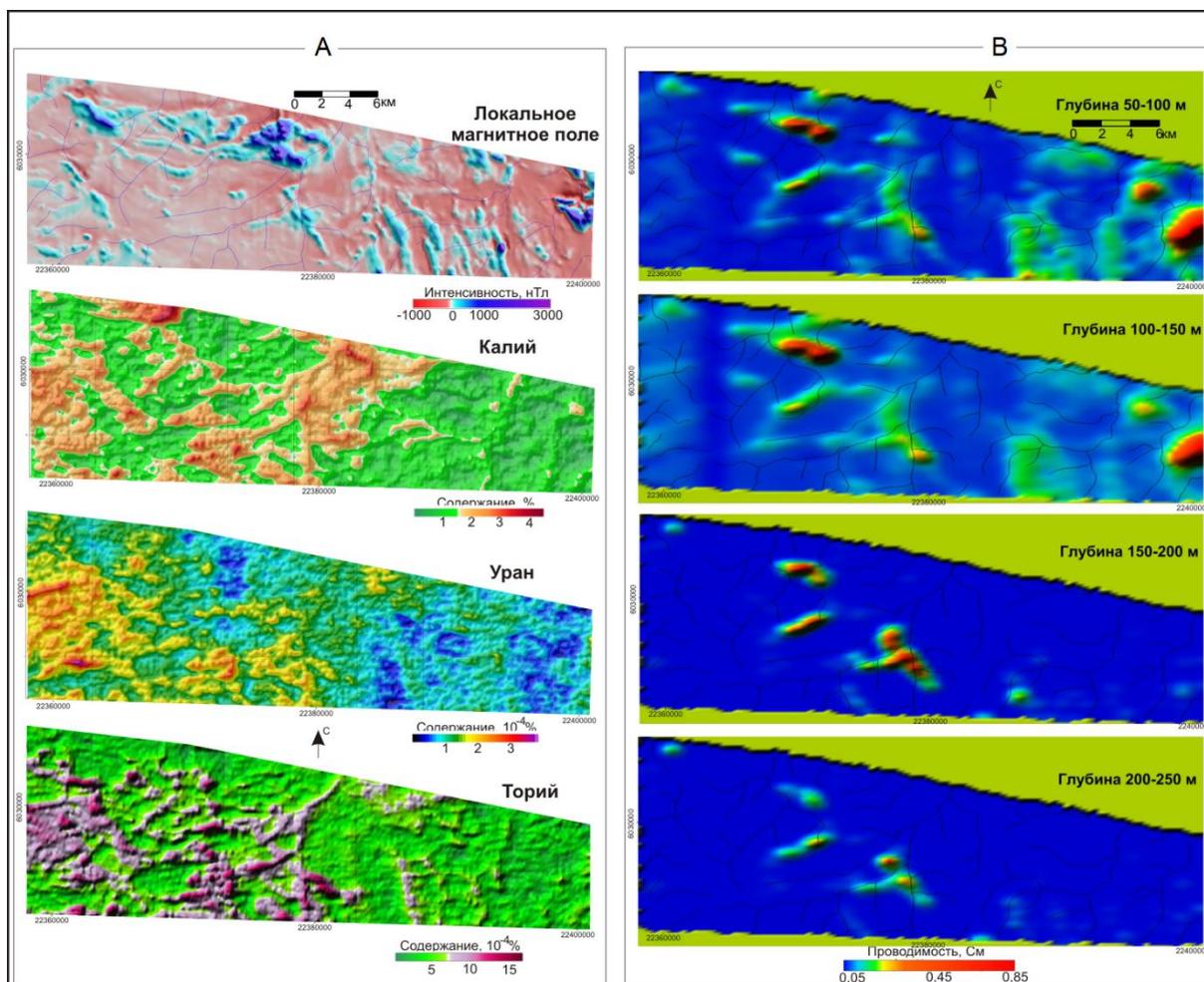


### Результаты исследований

Интерпретация данных производилась в следующей последовательности: качественный анализ, статистическая обработка, количественные расчеты, комплексная интерпретация.

Аномальное магнитное поле характеризуется чрезвычайно сложным строением с изменением интенсивности от минус 730 до 3430 нТл (рис. 1). Наиболее крупная аномальная зона субширотного простирания, сформированная разнообразными по морфологии и интенсивности максимумами, расположена на северо-западе и севере площади. Вторая

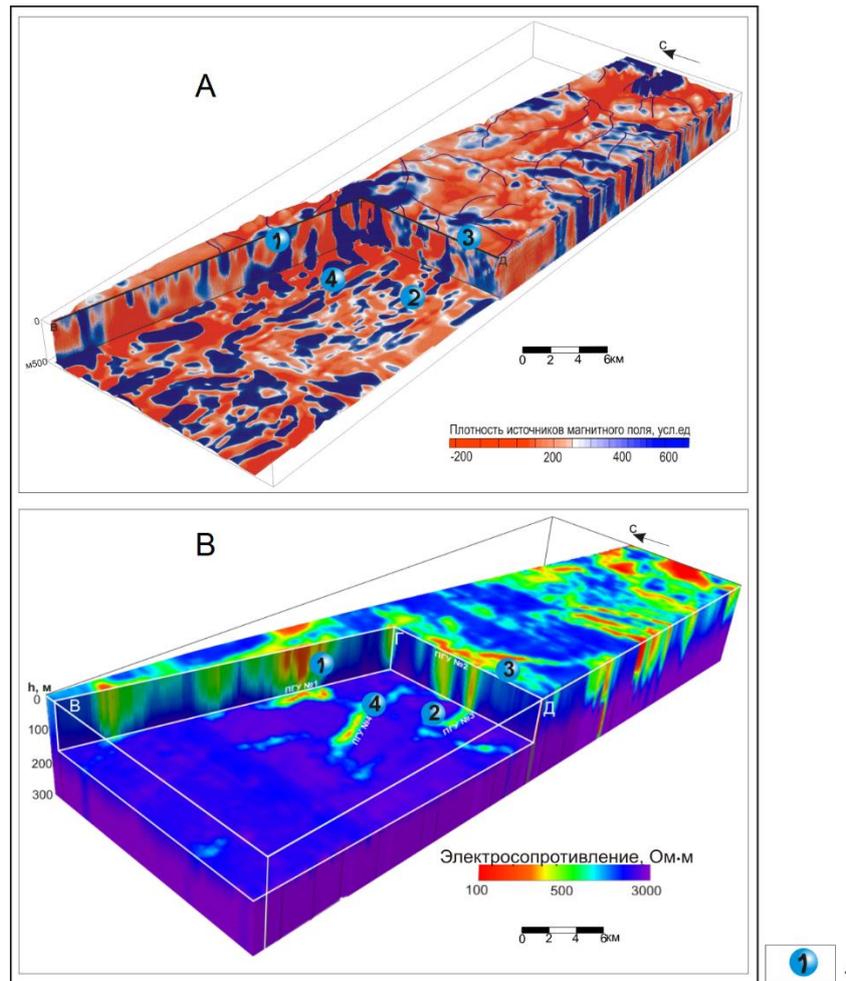
обширная зона находится на юго-востоке, центре площади, а на крайнем востоке – третья. Природа большей части магнитных аномалий связана с интрузиями основного-ультраосновного состава раннемелового комплекса, в меньшей степени – с контактово-измененными породами, а также с амфиболитами и железистыми кварцитами<sup>4,5</sup> [9]. По результатам 3D-инверсии, выполненной в приложении пакета Coscad-3D (МГГУ, Россия), большей частью аномалиеобразующие объекты распространены до глубины 500 и более метров (рис. 2).



**Рис. 1. Исходные геофизические поля (A) и распределение проводимости на глубине по данным 1D-инверсии (B)**  
**Fig.1. Initial geophysical fields (A) and at-depth distribution of conductivity based on 1D-inversion (B)**

<sup>4</sup> Физические свойства горных пород и руд. Справочник геофизика / ред Н.Б. Дортман. М.: Недра, 1984. 453 с.

<sup>5</sup> Дортман Н.Б. Петрофизика: справочник. Горные породы и полезные ископаемые. М.: Недра, 1992. 391 с.



**Рис. 2. Результаты количественной интерпретации магнитного (А) и электрометрического (В) полей:**

1 – номера перспективных геофизических участков первой очереди

**Fig. 2. Quantitative interpretation results for magnetic (A) and electrometric (B) fields**

1 – numbers of the promising geophysical sites, first priority

Содержания естественных радиоактивных элементов (ЕРЭ) характеризуются рядом специфических особенностей. В целом концентрации отличаются пониженным уровнем, обусловленным древним возрастом пород, участвующих в геологическом строении площади. Общие вариации содержаний ЕРЭ по площади следующие: калий – 0,1–4 %, уран –  $(0,2–3,6) \cdot 10^{-4}$  %, торий –  $(0,5–16) \cdot 10^{-4}$  %. Наиболее низкие величины наблюдаются в восточной трети площади, что объясняется повышенной мощностью рыхлых образований. На этом фоне выделяются аномальные зоны повышенных значений, контролируемые интрузии кислого состава. Одна из

таких зон расположена на севере, другая находится в центре. Схожая по интенсивности аномальная зона прослежена на западе площади. Зона характеризуется близкой к дугообразной формой с выпуклостью на юг. Природа ее связывается с гранитизацией нижнеархейских отложений. Ореолы аномально низких содержаний соответствуют полям развития основных-ультраосновных интрузий металлоносного раннемелового комплекса. В долинах современных водотоков наблюдается как аккумуляция природных изотопов, так и, хотя и в меньшей степени, вынос. Концентрации природных изотопов в долинах достигают предельных величин. Мощность экспозиционной дозы



характеризуется аналогичным распределением при вариациях 0,2–31 мкР/ч.

Электрометрическая характеристика приводится по распределению средневзвешенной проводимости в интервалах определенных глубин, оцененных по данным 1D-инверсии (программа *lfstem*, ЗАО «Аэрогеофизическая разведка», Россия).

Суммарная проводимость верхней части разреза в интервале глубин 50–100 м распределена довольно сложным образом (см. рис. 1). Общие изменения заключены в пределы 0,04–0,75 См (сопротивление – 70–2900 Ом·м). Максимумы проводимости, представляющие наибольший поисковый интерес, формируют несколько аномальных зон. Наибольшая по размерам – пространственно совмещена с магнитной аномальной зоной и расположена на северо-западе площади. В пределах зоны зафиксировано четыре сближенных максимума, разнообразных по размерам и форме. Южнее находится другая аномальная зона дугообразных очертаний выпуклостью на юг. К юго-востоку от нее, в центре площади расположена аномальная область, представленная линейными максимумами с различной ориентировкой. Еще далее на юго-восток закартирована зона, сформированная сближенными линейными максимумами субмеридионального простирания. Природа охарактеризованных аномальных зон большей частью обусловлена комплексом факторов: скоплением сульфидов, развитием кор выветривания, интенсивной трещиноватостью, графитизацией, приконтактной минерализацией. Аномальная зона, расположенная на крайнем востоке, состоит из двух обширных максимумов сложной формы, приближающейся к изометричной. Предельно низкие величины связываются с неоген-четвертичными глинами, заполняющими наложенные тектонические впадины. Об этом свидетельствует ограниченная мощность низкоомного горизонта (около 100–200 м). На более глубинных горизонтах зоны проводимости,

вызванные преимущественно скоплениями сульфидов, претерпевают незначительные изменения, что указывает на значительный размах сульфидизации (оруденения). Максимумы, связанные с глинистыми образованиями, на глубине 150–200 м практически отсутствуют.

Известные рудные объекты (рудные участки) тяготеют к локальным максимумам проводимости (минимумам сопротивлений), связанным с сульфидизацией, аномалиям магнитного поля и ореолам пониженных концентраций ЕРЭ, контролирующих преимущественно малые интрузии основного-ультраосновного состава. О характеристиках потенциальных рудных объектов (контрастных проводников) в нижнем полупространстве можно судить по блок-диаграмме, представленной на рис. 2.

Сложные распределения геофизических и радиохимических параметров обусловили необходимость использования статистического анализа различными способами для установления «геофизических» образов рудных объектов и выявления поисковых факторов, контролирующих оруденение. Наиболее информативными параметрами, задействованными в статистической обработке, явились величины аномального магнитного поля, сопротивления на глубине 200 м и мощность экспозиционной дозы. Статистические расчеты выполнены в приложениях пакета *Coscad-3D*.

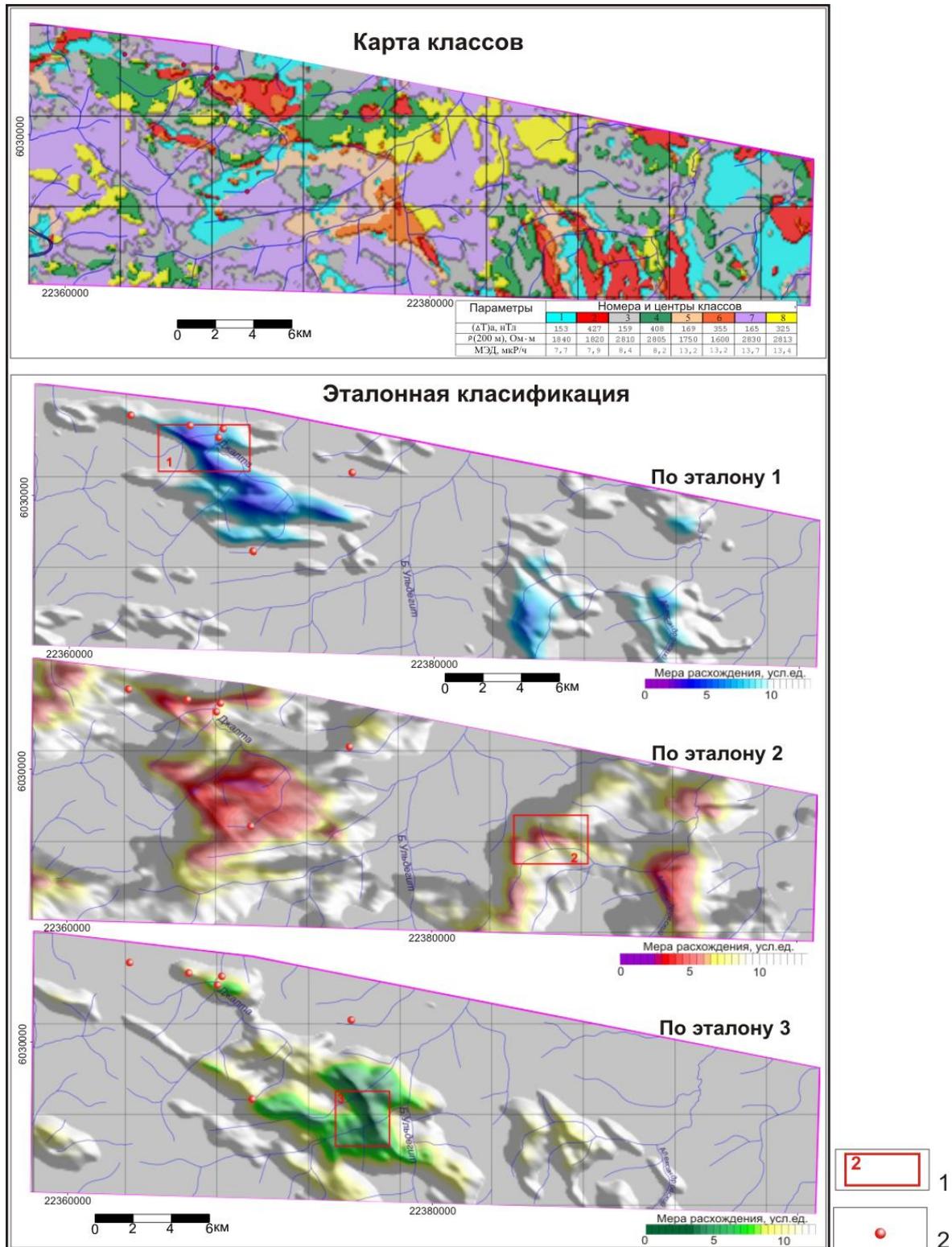
В результате статистической обработки методом динамических сгущений (К-средних) выделено восемь классов, характеризующихся специфическими геофизическими показателями и отвечающих определенным геологическим образованиям (рис. 3).

Класс 2 отнесен к «рудному» вследствие аномально высокого уровня магнитного поля при резко сниженных сопротивлениях и радиоактивности (соответственно 427 нТл, 1820 Ом·м, 7,9 мкР/ч). На его основе выделен рудоконтролирующий комплекс (РКК) первого типа, локализованный на северо-западе и юго-востоке



площади. Класс 6 также представляется «рудным» с предположительно широким развитием радиоактивных метасомати-

тов (355 нТл, 1600 Ом·м, 13,2 мкР/ч). Он является аналогом РКК второго типа, зафиксированным в центре территории.



**Рис. 3. Результаты статистической обработки способами K-средних и эталонной классификации:**  
1 – эталонные участки и их номера; 2 – известные медно-никелевые рудопоявления  
**Fig. 3. Statistical processing results by K-means and reference classification:**  
1 – reference sites and their numbers; 2 – known copper-nickel ore occurrences



По результатам эталонной классификации предпринята попытка выделения собственно рудных объектов (зон). В качестве эталона 1 выбран рудный участок, включающий три рудопроявления с содержанием никеля более 1 %. Области наибольшего соответствия эталону обозначились на северо-западе и юго-востоке площади, где хорошо согласуются с «рудным» классом 2. Анализ при использовании эталона 2, расположенного в пределах известного рудного участка на юго-востоке, в общем выявил похожую картину, что свидетельствует о сходстве обоих эталонов. Области минимальных расхождений с искомыми образами расположены там же. Данные итогов статистической обработки на основе эталона 3, охватывающего участок в центре площади, установили несколько иную ситуацию. Наибольшая по размерам область, соответствующая искомому объекту, расположена в непосредственной близости от эталона. Значительно меньшая по параметрам – приходится на северо-запад. Последнее, вероятно, свидетельствует о «смешанном» типе оруденения, естественно, в формате статистических образов.

Представляется, что использование результатов эталонной классификации при поисковых работах должно быть взвешенным и не подменять собой всю остальную исходную информацию. Вытекает это из известного тезиса «каждое месторождение уникально». Отсюда поисковый интерес представляют не конкретные геофизические параметры месторождений, а типичные ситуации (обстановки), характеризующие рудный процесс в целом.

По совокупности полученной информации на изученной площади выделено восемь структурно-вещественных комплексов (СВК) (рис. 4). Процедура обособления СВК основана на комплексном районировании имеющихся геофизических и радиохимических полей, их производных, а также на результатах статистического анализа. Последнее рассма-

тривается как «количественное» районирование полей.

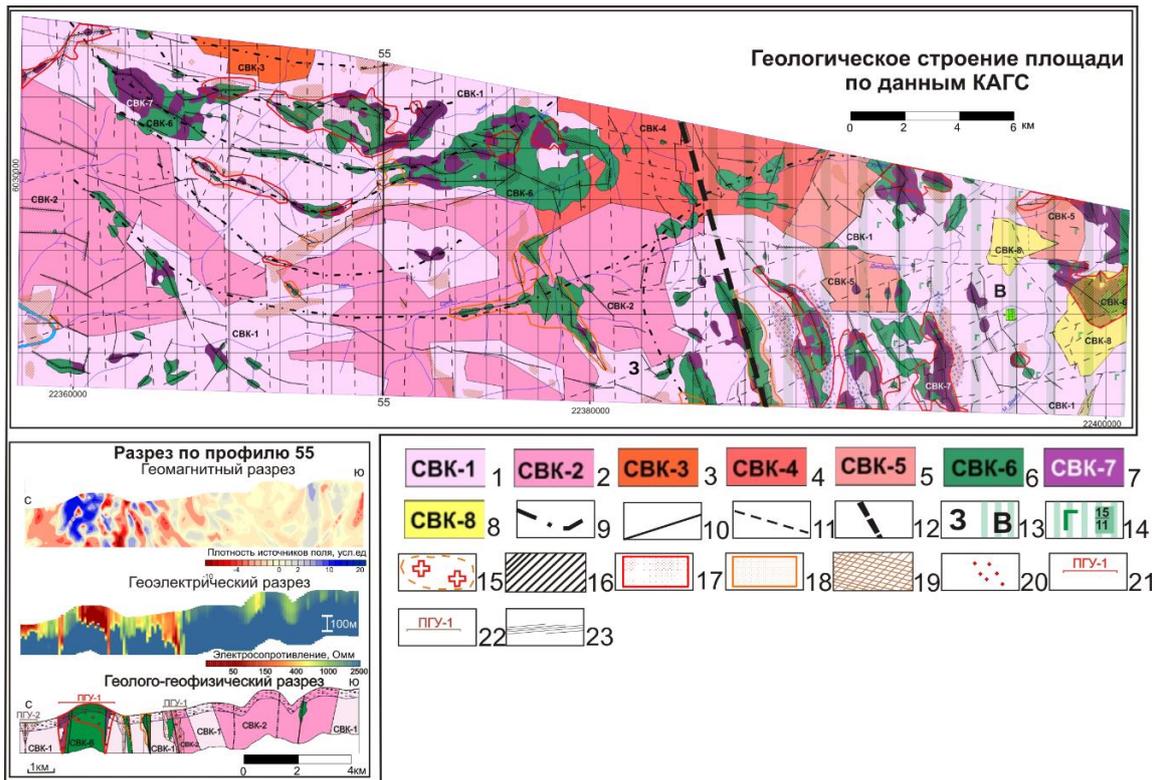
Наиболее распространенный СВК-1 обособлен по «фоновым» значениям геофизических и радиохимических параметров. Представлен СВК нерасчлененными интенсивно метаморфизованными гнейсами, кристаллическими сланцами, а также плагиогранитами, гранитами позднеархейского комплекса. Столь широкий ряд пород, формирующих СВК, объясняется длительной геологической историей развития, глубоким метаморфизмом, в результате которого физические свойства перечисленных образований были существенно нивелированы.

СВК-2 соотнесен с теми же породами, но претерпевшими интенсивную гранитизацию. Комплекс выделен по «фоновым» геофизическим полям и значимому повышению содержания природных изотопов и общей радиоактивности. Рассматриваемые образования распространены в центре и на юге западной половины площади. Они формируют обширные области сложной формы с выраженной «дугообразностью».

СВК-3 отождествлен с гранитами протерозойского комплекса. Выделен он по «классическому» сочетанию полей: низким величинам магнитного поля, высоким электросопротивлениям (низкой проводимости), аномально высоким содержаниям калия, повышенным концентрациям урана и низким – тория, высокой радиоактивности. Зафиксирован комплекс у северо-западной границы съемки.

СВК-4 контролирует гранитную составляющую палеозойского комплекса. Для него характерны несколько повышенный уровень магнитного поля, высокие сопротивления, повышенные содержания калия, урана, тория и высокий уровень гамма-излучения. Расположены описанные образования на севере площади.

СВК-5 является аналогом гранодиорит-диоритовой составляющей вышеописанного магматического комплекса.



**Рис. 4. Результаты аэрогеофизических исследований:**

1–8 – структурно-вещественные комплексы: 1 – нерасчлененные архейские образования, 2 – гранитизированные архейские породы, 3 – протерозойские гранитоиды позднестанового комплекса, 4 – палеозойские граниты худачинского комплекса, 5 – палеозойские диориты худачинского комплекса, 6 – меловые основные-ультраосновные породы джалтинского комплекса, 7 – меловые ультраосновные образования джалтинского комплекса, 8 – неоген-четвертичные глины, пески, галечники; 9–12 – системы разрывных нарушений: 9 – первая, протерозойская, дорудная (дугообразные (кольцевые) разломы), 10 – вторая, меловая (магмоподводящие разрывы (в пределах рудоконтролирующего комплекса – рудоконтролирующие)), 11 – третья, кайнозойская, пострудная (разнонаправленные разрывные нарушения), 12 – глубокий, коровой разлом мелового заложения; 13 – наиболее крупные тектонические блоки: 3 – Западный, В – Восточный с базитовым плутоном; 14 – глубинная интрузия основного состава, рудогенерирующий источник (в числителе – глубина залегания, в знаменателе – мощность, км); 15 – нескрытые гранитоиды; 16 – приповерхностные магматические тела основного-ультраосновного состава; 17–18 – рудоконтролирующие комплексы сульфидного медно-никелевого оруденения: 17 – первого типа (основные-ультраосновные интрузии, сульфиды, зоны дробления, частично метасоматиты), 18 – второго типа (основные-ультраосновные интрузии, сульфиды, метасоматиты, зоны дробления); 19 – предполагаемые коры выветривания; 20 – концентрированная сульфидизация; 21 – интервалы перспективных геофизических участков первого типа оруденения; 22 – рудоконтролирующие комплексы кор выветривания; 23 – экзогенная трещиноватость

**Fig. 4. Results of the aerogeophysical studies:**

1–8 – structure-substance complexes: 1 – undifferentiated Archean formations, 2 – granitization of Archean rocks, 3 – Proterozoic granitoids, late Stan complex, 4 – Paleozoic granites, Hudachinsky complex, 5 – Paleozoic diorites, Hudachinsky complex, 6 – Cretaceous basic-ultrabasic rocks, Jaltinsky complex, 7 – Cretaceous ultramafic formations, Jaltinsky complex, 8 – Neogene-Quaternary clay, sand, pebble; 9–12 – faulting systems: 9 – the first system, Proterozoic, pre-ore (Arcuate (ring) faults), 10 – the second system, Cretaceous (Magma-delivering faults (within the OCC, ore-controlling)), 11 – the third system, Cenozoic, post-ore (Divergent faults), 12 – deep rift, Cretaceous occurrence; 13 – the largest tectonic blocks: W – Western, E – Eastern, mafic pluton; 14 – in-depth intrusion of the basic composition, ore-generating source (the numerator indicates the depth, the denominator, thickness, km); 15 – sealed granitoids; 16 – near-surface magmatic bodies, basic-ultrabasic composition; 17–18 – ore-controlling complexes, sulfide copper-nickel mineralization: 17 – first type (basic-ultrabasic intrusion, sulfides, crush zones, in part, metasomatic rocks), 18 – second type (basic-ultrabasic intrusion, sulfides, metasomatic rocks, crush zones); 19 – estimated weathering crust; 20 – concentrated sulphidation; 21 – intervals of promising geophysical sites, the first type of mineralization; 22 – same, weathering crusts ore-controlling complexes; 23 – exogenous fractures



Соответственно, он обособлен по тому же уровню магнитного поля, несколько сниженным электросопротивлениям, пониженным концентрациям природных изотопов и радиоактивности. СВК-5 представлен двумя массивами сложной формы на севере восточной половины съемки.

СВК-6 выделен по аномально высоким величинам магнитного поля (основной критерий), зачастую пониженным электросопротивлениям (высокой проводимости), низким величинам гамма-активности, пониженным содержаниям калия, урана, большей частью низким концентрациям тория. Границы СВК проведены по зонам максимальных градиентов магнитного поля. Комплекс, как это следует из физико-радиохимической характеристики, соотнесен с нерасчлененными базит-ультрабазитовыми интрузиями мелового комплекса. Эти образования проявлены в виде многочисленных относительно небольших тел сложной формы, распространенных на значительной части площади. Некоторые интрузии обнажаются на поверхности, однако значительная часть залегает на глубине (до 500 и более метров). В целом разрозненные приповерхностные магматические тела имеют общие глубинные корни. Параметры основных-ультраосновных тел не выдержаны и изменяются от первых сотен метров до 3,5×8 км. Наибольшая плотность основных-ультраосновных тел зафиксирована на севере площади, где наблюдается их субширотное простираание, и в центре, где они ориентированы в северо-западном и север-северо-западном направлении. СВК-6 считается одним из рудовмещающих образований.

СВК-7 объединяет гипербазитовые интрузии мелового комплекса. Вычленен он по зонам с аномально низкими радиоактивностью и содержаниями ЕРЭ, зафиксированными в пределах СВК-6. Размеры предполагаемых тел ультраосновного состава также не выдержаны и варьируют от первых сотен метров до первых километров. СВК-7 рассматривается в

качестве основного рудовмещающего комплекса.

СВК-8 отвечает пескам, глинам, галечникам неоген-четвертичного возраста. Выделен он по низким электросопротивлениям (высокой проводимости), обусловленным тонкодисперсной составляющей нелитифицированных пород. С глубиной сопротивление резко возрастает, что связано с относительно ограниченной мощностью рыхлых образований. Кроме того, СВК-8 характеризуется низким уровнем гамма-активности и пониженными концентрациями калия при наличии выраженных ореолов урана и тория. Представлен СВК двумя наложенными впадинами на востоке площади, по форме близкой к изометричной. Мощность рыхлых образований достигает 100–150 м.

Контакты между отмеченными СВК большей частью тектонические.

На исследованной площади интенсивно проявлена дизъюнктивная тектоника, обусловившая выраженное блоковое строение. Выделено два наиболее крупных тектонических блока – Западный, занимающий 2/3 территории съемки, и Восточный. Формально Восточный блок отличается от Западного значимым снижением концентраций ЕРЭ и общей радиоактивности, пониженными электросопротивлениями на малых глубинах, другим генеральным простираанием магнитных максимумов, а также высокими величинами поля силы тяжести (данные предшествующих работ). В рельефе ему соответствуют отрицательные морфоэлементы (наложенные впадины).

Приведенные закономерности связаны со становлением глубинного плутона основного состава, развитого в низах блока Восточного и контрастно проявленного в гравитационном поле. Его расчетная плотность по данным 2D-моделирования (приложение пакета MontajOasis) составляет 2,89 г/см<sup>3</sup> и сопоставима с плотностью интрузий мелового комплекса. Глубина залегания верхней



кромки – 15 км, вертикальная мощность – 11 км, горизонтальная – 6 км. Сечение тела – трапециевидное. Центр глубинной интрузии приходится на восточную границу площади. Простирается – северо-западное. В региональном магнитном поле массив контролируется крупными, интенсивными максимумами. Плутон, судя по пространственному положению и физическим свойствам, рассматривается как потенциально рудогенерирующий источник. Блок Восточный подвергнут большей трещиноватости и опущен относительно Западного, что следует из общего развития плутона – внедрение, кристаллизация, проседание надинтрузивной толщи.

Контактируют блоки по тектоническому шву, развитому, вероятно, до подошвы земной коры. Время его активизации соотносится с меловым (синрудным) периодом. Кроме того, на изученной площади выделено три системы разрывных нарушений, влияющих на локализацию оруденения.

Первая система, по времени заложения условно определяемая как дорудная, сформирована дугообразными (кольцевыми) нарушениями. Большая их часть находится в западной половине площади, где они образуют концентрическую ассоциацию выпуклостью на юг при достаточно выдержанном расстоянии между сегментами (около 2 км). Предполагаемый центр расположен севернее площади в пределах гранитов протерозойского комплекса. Очевидно, что развитие раннепротерозойского интрузива (СВК-3) и обусловило столь специфический рисунок. В западном направлении кольцевые дизъюнктивы прослеживаются до границы площади КАГС, а на востоке – «отсекаются» упомянутым глубинным межблоковым разломом. На востоке предположительно выявлена схожая дугообразная структура с выпуклостью на запад. Природа ее может быть увязана со становлением глубинной интрузии. Время заложения, соответственно, относится к меловому периоду. Рассмотренные дизъюнктивы обособ-

лены по цепочечным максимумам аномального и локального магнитного поля. Часть из них контролируется линейными зонами низких электросопротивлений, имеющих существенное распространение на глубину. В распределении природных изотопов и общей радиоактивности дугообразные нарушения находят отражение в виде вытянутых максимумов или минимумов. Хорошо они просматриваются и в современных формах рельефа, что указывает на их перманентную активизацию. Углы падения сместителей – крутые, близкие к вертикальным. Размеры сопровождающих зон дробления вкрест простирания по данным аэроэлектроразведки достигают первых сотен метров.

Вторая система нарушений сформирована укороченными кулисообразно расположенными разрывами различного простирания. На севере площади они имеют генеральную субширотную ориентировку, а на западе и юге – северо-западную, север-северо-западную. Обособлены характеризуются дизъюнктивы по линейным максимумам магнитного поля базит-ультрабазитовой природы, а также минимумам содержания ЕРЭ и гамма-активности. Часть из них контролируется линейными зонами низких сопротивлений. В соответствии с природой аномалиеобразующих объектов эти нарушения отнесены к магмоподводящим, вмещающим основные-ультраосновные интрузии. По отношению к дугообразным дизъюнкциям они являются большей частью опережающими и по времени образования – меловыми. Падение углов сместителей – субвертикальное. Обобщенная протяженность магмоподводящих нарушений может достигать 10 км. Те из них, что находятся в пределах рудовмещающих комплексов, рассматриваются как рудоконтролирующие.

Третья система объединяет разрывы различной ориентировки, отнесенные к пострудному этапу тектонической активизации. Последнее следует из их деформирующего влияния на магмопод-



водящие (рудоконтролирующие) дизъюнктивы. Основные простирания нарушений выдержаны в субмеридиональном, субширотном и северо-восточном направлениях. Большая часть разрывов продолжается за пределами съемки, то есть их протяженность явно превышает первые десятки километров. Выделены они по коррелируемому смещению разломов второй системы, а также изменению их простирания. В геофизических и радиохимических полях рассматриваемые нарушения фиксируются торцевыми сочленениями аномалий, несогласными изменениями их формы, реже непосредственно по линейным ореолам и аномалиям различного знака.

Минерализованные зоны, контролируемые физическими и радиохимическими показателями, широко распространены на площади. Они имеют различные параметры, генезис и проявление.

Зоны пирротинизации, в первом приближении соответствующие интрузиям основного-ультраосновного состава (СВК-6) и собственно ультрабазитам (СВК-7), охарактеризованы выше. Основной аномалиеобразующий компонент – магнитный моноклинный пирротин. Магнитные магматические тела (пирротиновые объекты) приповерхностного залегания контролируются линейными максимумами локального магнитного поля. Фиксируются они, естественно, в непосредственной близости от магмоподводящих разломов.

Зоны углеродсодержащих пород, рассматриваемые преимущественно как «помехи», могут хорошо проявляться в виде линейных минимумов электросопротивлений (максимумов проводимости), так же, как и участки концентрированной сульфидизации (пирротинизации), несущей оруденение. Кроме этого, снижение сопротивлений могут вызвать тонкодисперсные рыхлые породы (глины), интенсивная трещиноватость (швы разломов), ряд других проводящих объектов. По общим сведениям обуглероженность сопровождается увеличе-

нием содержания урана, что помогает уверенно идентифицировать данную помеху.

Зоны отложений кор выветривания могут выступать в качестве «полезных» объектов, когда они развиваются на рудоносном сульфидном субстрате, и в виде помех в случае иного исходного материала. Маркируются они аномалиями низких сопротивлений и некоторыми косвенными признаками: снижение интенсивности магнитных аномалий, повышенная концентрация ореолов выноса или привноса ЕРЭ.

Зоны метасоматически измененных пород как поисковый фактор в общем случае обособляются локальными повышениями содержания ЕРЭ и уровня гамма-излучения.

По совокупности данных, включая результаты статистической обработки материалов КАГС, на площади выделено два РКК. РКК-1 характеризуется типичным пакетом факторов, описывающих сульфидное медно-никелевое оруденение [7, 10]. Это наличие основных-ультраосновных и гипербазитовых образований при доминировании последних, концентрированного скопления сульфидов с преобладанием пирротина, метасоматически измененных пород. В физических и радиохимических полях РКК-1 соответствуют комплексные, большей частью пространственно совмещенные аномалии: предельные максимумы магнитного поля, локальные минимумы содержания ЕРЭ и гамма-излучения и интенсивные минимумы электросопротивлений. Метасоматиты проявляются в виде небольших по размерам и амплитуде максимумов концентраций природных изотопов и радиоактивности на фоне общего снижения содержания ЕРЭ. Наибольшее распространение РКК-1 получил на севере, северо-западе и юго-востоке площади. Форма и размеры фрагментов РКК-1 разнообразны.

РКК-2 формирует схожий ансамбль рудоконтролирующих объектов, но при повышенных концентрациях природных



изотопов и радиоактивности. Возможно, это связано с более интенсивными метасоматическими процессами. Наиболее развит РКК на юге территории, где закартированы два крупных фрагмента подобного типа. На северо-западе наблюдаются участки развития смешанного типа оруденения, но преобладает все же обстановка, свойственная РКК-1. По степени вероятности выявления промышленно значимого оруденения РКК-1 представляется более перспективным вследствие большей пространственной близости рудоконтролирующих образований и соответствия «классическому» облику.

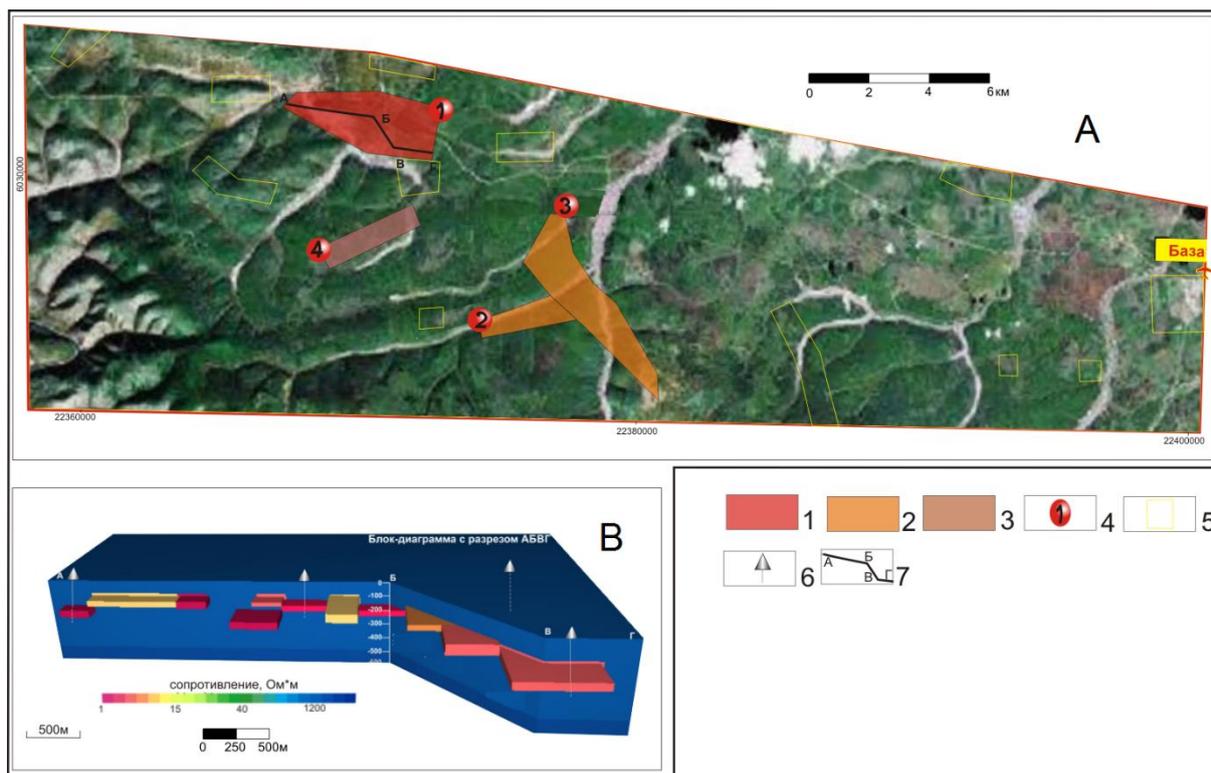
Особого рода рудоконтролирующие объекты могут располагаться в пределах интенсивного развития кор выветривания на сульфидном субстрате. Выделены они по зонам минимальных электросопротивлений, не сопровождаемым выраженными аномалиями магнитного поля, а также по локальным минимумам или максимумам ЕРЭ и радиоактивности. Такие же сочетания свойственны областям повышенной мощности рыхлых отложений или развития углеродсодержащих (графитизированных) образований. Диагностика таких объектов, как рудоконтролирующие, основана на выявлении реликтов пирротинизированных тел. Расположены они часто вблизи интрузий мелового комплекса. Форма их преимущественно линейная, размеры разнообразны и достигают 0,5×4 км.

Выбор перспективных геофизических участков (ПГУ) осуществлен на основе обобщенной (схематической) физико-геологической модели сульфидного медно-никелевого оруденения [4, 5, 7]. Как ранее упоминалось, на исследованной площади установлено три типа оруденения: вкрапленные руды в магматических породах преимущественно ультраосновного состава (пироксениты, кортландиты, горблендиты), сплошные (массивные) руды в тектонических зонах, прожилково-вкрапленные руды в экзоконтактах магматических пород. Типичный состав руд по мере убывания представлен

пирротинном, халькопиритом, пентландитом, магнетитом. В общем виде отмеченный пакет контролируется аномально высокими значениями магнитного поля, обусловленными моноклинным пирротинном, низкими содержаниями природных изотопов и пониженной радиоактивностью, свойственными породам ультраосновного (частично основного) состава, аномально низкими электросопротивлениями, вызванными скоплениями сульфидов и зонами дезинтеграции. На фоне низких концентраций ЕРЭ вероятны локальные повышения, связанные с метасоматически измененными образованиями. Таким образом, приведенные факторы, имеющие пространственное совмещение и расположенные в пределах выделенных РКК, указывают на рудную зону (ПГУ). Участки, находящиеся на площадях РКК второго рода, характеризуются более контрастными ореолами ЕРЭ и, соответственно, большим развитием метасоматитов. На всех ПГУ предполагается присутствие отложений кор выветривания. Степень дезинтеграции пропорциональна интенсивности максимумов проводимости (минимумов сопротивления) в верхней части разреза.

По комплексу полученной информации выделено двенадцать перспективных геофизических участков различной очередности заверки: ПГУ-1 – первой очереди (четыре участка) и ПГУ-2 – второй (восемь участков) (рис. 5).

ПГУ-1 № 1 расположен на северо-западе площади в пределах «смешанного» оруденения (РКК-1 и РКК-2 при доминировании первого). Для него характерно наличие всех рудоконтролирующих факторов со следующими геофизическими показателями: амплитуда магнитных аномалий свыше 600 нТл, сопротивления существенно понижаются с глубиной от 200 Ом·м (на 50 м) до 50 Ом·м (на 200 м), суммарная проводимость варьирует с глубиной в пределах 0,45–0,13 См, содержания ЕРЭ и гамма-активности образуют сближенные ореолы и аномалии «полярных» знаков. Концентрации



**Рис. 5. Расположение перспективных геофизических участков (А) и результаты 3D-инверсии на перспективном геофизическом участке № 1 (В):**  
 1–4 – перспективные геофизические участки первоочередной заверки (ПГУ-1): 1 – сульфидного медно-никелевого оруденения первого типа, 2 – сульфидного медно-никелевого оруденения второго типа, 3 – оруденение в корах выветривания, 4 – номера ПГУ-1; 5 – перспективные геофизические участки второй очереди заверки (ПГУ-2); 6 – рекомендуемые скважины с целью вскрытия и оценки оруденения; 7 – линия разреза на перспективном геофизическом участке № 1

**Fig. 5. Location of the promising geophysical sites (A) and results of 3D-inversion at PGS №1 (B):**  
 1–4 – promising geophysical site, first-stage certification (PGS-1): 1 – sulfide copper-nickel mineralization, type 1, 2 – same, type 3, 3 – mineralization in the weathering crusts, 4 – numbers of PGS-1; 5 – promising geophysical sites, second-stage certification (PGS-2); 6 – wells recommended for opening and evaluation; 7 – profile line at PGS № 1

соответственно равны: калий – 1,5 и 0,4 %, уран –  $1,2 \cdot 10^{-4}$  и  $0,5 \cdot 10^{-4}$  %, торий –  $8 \cdot 10^{-4}$  %. В контурах ПГУ и его непосредственной близости отмечены ареалы и рудопроявления сульфидных руд с содержанием никеля от 0,1–0,7 до 1 и более процентов. По размерам это наиболее крупный участок –  $1,7 \times 4,9$  км. Потенциальный рудный объект падает в южном направлении под крутым углом.

ПГУ-1 № 2 обособлен в центре площади в пределах РКК второго типа. Соответственно, его характеристика несколько отличается от вышеприведенных: амплитуда аномалий магнитного поля составляет 400 нТл, электросопротивление снижено до 300 Ом·м и с глубиной не изменяется, проводимость в

интервале глубин 50–200 м составляет 0,1–0,15 См, максимумы и минимумы ЕРЭ сближены при соответствующих концентрациях у калия – 2 и 0,4 %, у урана –  $1,7 \cdot 10^{-4}$  и  $0,67 \cdot 10^{-4}$  %, тория –  $11,57 \cdot 10^{-4}$  и  $3,27 \cdot 10^{-4}$  %. Параметры участка составляют  $0,8 \times 3,3$  км. Падение рудного объекта – от крутого в южном направлении до вертикального.

ПГУ-1 № 3 сочленяется с вышеприведенным участком с востока. По физико-геохимическим показателям он практически идентичен участку № 2 при более высоких амплитудах магнитных максимумов (750 нТл) и минимумов проводимости (0,2–0,22 См). В контуре ПГУ закартирован ареал сульфидных руд с содержанием никеля 0,1–0,7 %. Размеры участка



№ 3 равны 1,4×7,8 км. Падение рудных объектов близко к вертикальному.

ПГУ-1 № 4 выделен южнее ПГУ-1 № 1 и расположен в пределах развития кор выветривания по сульфидному субстрату. На это указывает следующее: реликты магнитных объектов – ограниченных размеров и амплитуды аномалий – 230 нТл, низкие электросопротивления, еще более уменьшающиеся с глубиной (от 400 Ом·м на 50 м до 300 Ом·м на 200 м), проводимость составляет 0,15 См, мозаично расположенные «разнознаковые» ореолы радиоактивной триады (калий – 1 и 0,3 %, уран –  $1 \cdot 10^{-4}$  и  $0,37 \cdot 10^{-4}$  %, торий –  $5,77 \cdot 10^{-4}$  и  $0,67 \cdot 10^{-4}$  %). Размеры участка составляют 0,95×3,7 км. Падение рудной зоны, судя по геометрии реликтов пирротиновых тел, близко к вертикальному.

По результатам 3D-моделирования геоэлектрической среды, выполненного в

пределах ПГУ № 1, выделены высокопроводящие геоэлектрические неоднородности, соответствующие сульфидному медно-никелевому оруденению (см. рис. 5). Это обеспечивает корректность рекомендаций местоположения, а также параметров бурения поисковых скважин. Очевидно, что высокая степень детализации рудных объектов позволяет либо резко сократить объемы проверочных наземных исследований, либо вообще обойтись без подобных экономически затратных работ.

### Заключение

Таким образом, рассмотренный комплекс аэрогеофизических работ представляется оптимальным при поисках и оценке объектов медно-никелевого оруденения в различных геологических обстановках и рекомендуется при решении аналогичных задач в сходных геолого-геофизических условиях.

### Библиографический список

1. Тригубович Г.М., Соловейчик Ю.Г., Рояк М.Э., Чернышев А.В., Персова М.Г. Трехмерная электроразведка МПП: теория и практика // Геологические аспекты минерально-сырьевой базы акционерной компании «АЛРОСА»: современное состояние, перспективы, решения: сб. тр. конф. «Актуальные проблемы геологической отрасли АК "АЛРОСА" и научно-методическое обеспечение их решений» (г. Мирный, 31 марта – 4 апреля 2003 г.). Мирный, 2003. С. 301–311.

2. Тригубович Г.М., Персова М.Г., Соловейчик Ю.Г. 3D-электроразведка становлением поля. Новосибирск: Наука, 2009. 217 с.

3. Kamenetsky F.M., Stettler E.H., Trigubovich G.M. Transients Geo-Electromagnetics. Munich: Ludwig-Maximilian-University of Munich, Vela Verlag, 2010. 304 p.

4. Бродовой В.В., Борцов В.Д., Подгорная Л.Е. [и др.]. Геофизические методы разведки рудных месторождений. М.: Недра, 1990. 295 с.

5. Андреев В.Е., Бобачев А.А., Варенцов Ив.М., Верещагина М.П., Куликов В.А., Яковлев А.Г. [и др.]. Комплексирование геофизических методов при поисках медно-никелевых руд на

объектах ГМК «Норильский Никель» // Разведка и охрана недр. 2006. № 8. С. 71–79.

6. Куликов В.А., Варенцов И.М., Стерлигова И.Д., Соловьева А.В. Оценка удельного электрического сопротивления богатых медно-никелевых руд Норильского региона // Геофизика. 2014. № 6. С. 25–29.

7. Мельников А.В., Степанов В.А., Гвоздев В.И. Рудопроявление Стрелка – представитель медно-никелевого и благороднометалльного оруденения в роговообманковых базитах (Верхнее Приамурье) // Вестник Амурского государственного университета. 2007. № 37. С. 111–116.

8. Шека С.А. Петрология и рудоносность никеленосных дунито-троктолитовых интрузий Станового хребта. М.: Недра, 1969. 136 с.

9. Магматические горные породы: монография / ред. О.А. Богатиков. Т. 5. Ультраосновные породы. М.: Наука, 1988. 508 с.

10. Степанов В.А. Медно-никелевые месторождения востока Евразии (литературный обзор современных представлений) // Вестник Камчатской региональной ассоциации «Учебно-научный центр». Науки о Земле. 2009. № 1. Вып. 13. С. 139–148.

### References

1. Trigubovich GM, Soloveichik YuG, Royak ME, Chernyshev AV, Persova MG. 3-D

Transient electrical survey: theory and practice. In: *Geologicheskie aspekty mineral'no-syr'evoi bazy*



aktsionernoi kompanii "ALROSA": sovremennoe sostoyanie, perspektivy, resheniya: sbornik trudov konferentsii "Aktual'nye problemy geologicheskoi otrasli Ak "Alrosa" i nauchno-metodicheskoe obespechenie ikh reshenii" = Geological aspects of the Alrosa JSC's mineral resources base: state-of-the-art, prospects, and solutions: Conf. collected papers "Present issues in the geological industry of JSC Alrosa, and R&D support", 31 March – 4 April 2003, Mirny. Mirny; 2003. p.301–311. (In Russ.)

2. Trigubovich GM, Persova MG, Soloveichik YuG. 3-D TEM sounding. Novosibirsk: Nauka; 2009. 217 p. (In Russ.)

3. Kamenetsky FM, Stettler EH, Trigubovich GM. Transients Geo-Electromagnetics. Munich: Ludwig-Maximilian-University of Munich, Vela Verlag; 2010. 304 p.

4. Brodovoi VV, Bortsov VD, Podgornaya LE, et al. Geophysical methods in ore deposit survey. Moscow: Nedra; 1990. 295 p. (In Russ.)

5. Andreev VE, Bobachev AA, Varentsov IvM., Vereshchagina MP., Kulikov VA, Yakovlev AG, et al. Integration of geophysical methods in prospecting for copper-nickel ores at Norilskiy Nikel GMK (ore mining and smelting enterprise). Prospect

and Protection of Mineral Resources. 2006;8:71–79. (In Russ.)

6. Kulikov VA, Varentsov IM, Sterligova ID, Solov'eva AV. Evaluation of the electrical resistivity of rich copper-nickel ores of the Norilsk region. Russian Geophysics. 2014;6:25–29. (In Russ.)

7. Mel'nikov AV, Stepanov VA, Gvozdev VI. Strelka ore occurrence as a representative of copper-nickel and precious metal mineralization in corniferous basic rocks (Verkhneye Priamurye). Vestnik Amurskogo gosudarstvennogo universiteta = Amursk State University Bulletin. 2007;37:111–116. (In Russ.)

8. Sheka SA. Petrology and ore-bearing capacity of the nickel-bearing dunite-troktolite intrusions of the Stanovoy Ridge. Moscow: Nedra; 1969. 136 p. (In Russ.)

9. Bogatnikov OA. Magmatic rocks. Vol. 5. Ultra-basic rocks. Moscow: Nauka; 1988. 508 p. (In Russ.)

10. Stepanov VA. Copper-nickel deposits of the east of Eurasia. Bulletin of Kamchatka Regional Association "Educational-Scientific Center". Earth Sciences. 2009;1(13):139–148. (In Russ.)

#### Критерии авторства / Authorship criteria

Пустозеров М.Г. написал статью, имеет на нее авторские права и несет ответственность за плагиат.

Maksim G. Pustozеров is the author of the article, holds the copyright and bears responsibility for plagiarism.

#### Конфликт интересов / Responsibility for plagiarism

Автор заявляет об отсутствии конфликта интересов.

The author declares that there is no conflict of interest regarding the publication of this article.

#### Сведения об авторе / Information about the author



**Пустозеров Максим Григорьевич,**

главный геофизик,

ЗАО «Аэрогеофизическая разведка»,

630007, г. Новосибирск, Октябрьская магистраль, 4, оф. 1207, Россия,

✉ e-mail: mpustozеров@yandex.ru

**Maksim G. Pustozеров,**

Chief Geophysicist,

CJSC "Aerogeophysical survey",

4/1207, Oktyabrskaya magistral', Novosibirsk, 630007, Russia,

✉ e-mail: mpustozеров@yandex.ru



Оригинальная статья / Original article

УДК 550.8.013; 550.837.8

## Сравнение эффектов вызванной поляризации для гальванической и индукционной установок в методах переходных процессов

© А.С. Башкеев<sup>а</sup>

<sup>а</sup>Иркутский национальный исследовательский технический университет, г. Иркутск, Россия

**Резюме:** Целью данной работы является сравнение аномальных откликов от эффектов вызванной поляризации в методах переходных процессов для гальванической и индукционной установок. Под гальванической понимается установка с использованием горизонтальной электрической линии в конфигурации «линия-линия», а под индукционной – незаземленные контуры в конфигурации «петля-петля». Учет быстро протекающей индукционно-вызванной поляризации, проявляющейся при наличии в среде поляризующихся объектов, позволяет избежать ложных аномалий по удельному электрическому сопротивлению и выделить аномалии по поляризуемости. Сравнение производится с помощью численного моделирования в рамках одномерной модели с учетом частотной дисперсии удельного электрического сопротивления, описываемой формулой Cole-Cole. В рамках примененной модели аномальный вклад вызванной поляризации для гальванической установки оказался больше, чем аномальный вклад индукционно-вызванной поляризации для индукционной установки. Вклад эффектов вызванной поляризации практически не спадает со временем в отличие от эффектов индукционно-вызванной поляризации.

**Ключевые слова:** численное моделирование, модель Cole-Cole, индукционная установка, гальваническая установка, метод переходных процессов

**Благодарности:** Работа выполнена при поддержке базовой части государственного задания Министерства образования и науки РФ № 13.7232.2017/8.9.

**Информация о статье:** Дата поступления 1 августа 2019 г.; дата принятия к печати 27 августа 2019 г.; дата онлайн-размещения 30 сентября 2019 г.

**Для цитирования:** Башкеев А.С. Сравнение эффектов вызванной поляризации для гальванической и индукционной установок в методах переходных процессов. *Науки о Земле и недропользование*. 2019. Т. 42. № 3. С. 303–311.

## Induced polarization effects comparison for galvanic and induction installations in transient electromagnetic methods

© Aiur S. Bashkeev<sup>а</sup>

<sup>а</sup>Irkutsk National Research Technical University, Irkutsk, Russia

**Abstract:** The purpose of the work is to compare the anomalous responses from the IP-effects in transient electromagnetic methods for galvanic and induction installations. By a galvanic installation is meant one using a horizontal electric line in a "line-line" configuration, and by an induction installation, one using ungrounded contours in a "loop-loop" configuration. Registering the fast decaying induction-induced polarization (IIP) that occurs in the geo-environment in the presence of polarized objects, makes it possible to avoid false electrical resistivity anomalies and to find polarizability anomalies. The comparison is realized using numerical modeling within the one-dimensional model with a frequency dispersion of electrical resistivity (described by the Cole-Cole formula). The modeling has shown that the anomalous IP-effect for the galvanic installation is higher than the IIP effect for the induction installation. The IP effect contribution virtually does not decay with time, as opposed to the IIP effect.

**Keywords:** numerical modeling, Cole-Cole model, induction configuration, galvanic configuration, transient electromagnetic method

**Acknowledgements:** The study was supported by the base part of the Government Assignment for Scientific Research from the Ministry of Education and Science of the Russian Federation № 13.7232.2017/8.9.

**Information about the article:** Received August 1, 2019; accepted for publication August 27, 2019; available online September 30, 2019.



**For citation:** Bashkeev A.S. Induced polarization effects comparison for galvanic and induction installations in transient electromagnetic methods. *Earth Sciences and Subsoil Use*. 2019;42(3):303–311. (In Russ.)

### Введение

Метод переходных процессов (МПП) или зондирования становлением поля (ЗС) в настоящее время широко применяется при решении разнообразных задач прикладной геофизики. Для ЗС теоретически обосновано применение различных типов установок, как диполей, так и контуров<sup>1–3</sup> [1], но на практике наиболее широкое распространение получило применение индукционной установки в виде незаземленных контуров, где в качестве генератора и приемника используются петли [2–4], что неслучайно, так как модельное представление кривых МПП (ЗС) изначально не предполагало наличие эффектов вызванной поляризации (ВП) и рассматривались в качестве помех, мешающих инверсии [5], в то время как гальванические установки с использованием заземленных диполей применялись в основном для исследований эффектов ВП [6, 7], где индукционная составляющая считалась помехой.

На сегодняшний день эффекты ВП успешно учитываются в моделировании данных МПП, в том числе в зондированиях становлением поля в ближней зоне [8, 9]. Надо отметить, что ВП при установке с источником в виде незаземленного контура из-за специфики индукционного возбуждения разреза называется быстропотекающей индукционно-вызванной поляризацией (ВПИ) [9]. Процессы, возникающие от эффектов ВП, в методах с гальванической установкой в качестве источника электромагнитного поля в виде горизонтального электрического диполя описаны достаточно давно [10], но одним из первых, использующих (помимо ВП) индукционную составляющую, стал дифференциально-нормиро-

ванный метод электроразведки (ДНМЭ), активно применяющийся для решения задач по поиску и разведке углеводородов [11, 12]. Развитием идей ДНМЭ для решения рудных задач геофизики занимается метод электромагнитного зондирования и вызванной поляризации (ЭМЗ-ВП) [13].

### Методы исследования

В МПП как для гальванической, так и для индукционной установок при измерениях во временной области в большинстве случаев в качестве источника тока используются генераторы (коммутаторы) прямоугольных импульсов. В таком случае при подаче импульсов тока в питающий контур или диполь возникают эффекты электромагнитной индукции и ВП.

Под гальванической установкой в данной работе имеется в виду установка с источником в виде горизонтальной электрической линии (ГЭЛ) или горизонтальный электрический диполь, как в аппаратно-программном электроразведочном комплексе «Марс» [14]. Проходящий через ГЭЛ электрический ток создает поле смешанного типа: поперечное электрическое (ТЕ – transverse electric) и поперечное магнитное (ТМ – transverse magnetic) поля. Сама линия (провод) является источником индуктивного поля и возбуждает ТЕ-поле в то время, как питающие электроды А и В – ТМ-поле<sup>4</sup>. Под индукционной установкой понимается установка с источником в виде незаземленной рамки, лежащей на дневной поверхности. Проходящий по этой рамке электрический ток возбуждает в отличие от ГЭЛ только ТЕ-поле<sup>5</sup>. Соответственно, индукционная установка заряжает среду только в момент выключения тока, когда резкое изменение магнитного поля

<sup>1</sup> Жданов М.С. Электроразведка: учебник для вузов. М.: Недра, 1986. 316 с.

<sup>2</sup> Крылов С.С. Геоэлектрика: поля искусственных источников: учеб. пособие. СПб.: Изд-во СПбГУ, 2004. 138 с.

<sup>3</sup> Могилатов В.С. Импульсная геоэлектрика: учеб. пособие. Новосибирск: Изд-во РИЦ НГУ, 2014. 181 с.

<sup>4</sup> Там же.

<sup>5</sup> Там же.



индуцирует в среде вторичные электрические поля, тогда как гальваническая заряжает среду двумя способами: индукционным, как в индукционной установке, и посредством тока пропускания в токовом импульсе. Из этого следует, что поляризующиеся объекты заряжаются дольше, имеют большую амплитуду по напряжению и, соответственно, дольше разряжаются (рис. 1).

Решение прямой задачи в рамках одномерных горизонтально-слоистых сред будет производиться в частотной области с последующим переходом во временную. Расчет компонентов электромагнитного поля для электрической ( $E_x$ ,  $E_y$ ) и магнитной ( $H_x$ ,  $H_y$ ,  $H_z$ ) составляющих производится через формулы компонент гармонического поля для горизонтально-слоистой среды в квазистационарном приближении, полученные через метод, основанный на спектральных преобразованиях поля<sup>6</sup>. Ознакомиться с исходными формулами можно в работе П.Ю. Пушкарева<sup>7</sup>. Сам расчет компонентов поля выполняется с помощью фильтра Рыжова, где ядерную функцию заменяют аппроксимирующим полиномом, что позволяет существенно ускорить вычисления [15].

Данные алгоритмы используются в программе одномерной инверсии «Mars1D» [16], где производилось решение прямой задачи в рамках одномерной горизонтально-слоистой феноменологической модели Cole-Cole [17], адаптированной для комплексной проводимости Пельтоном [18]. Формула представлена для удельного электрического сопротивления (УЭС):

$$\rho(\omega) = \rho_0 \left[ 1 - \eta \left( 1 - \frac{1}{1 + (i\omega\tau)^c} \right) \right], \quad (1)$$

где  $\rho$  – частотно-зависимое УЭС;  $\rho_0$  – сопротивление на постоянном токе;  $i$  – мнимая единица;  $\omega$  – круговая частота;  $\eta$  – коэффициент стационарной поляризуемости среды ( $0 \leq \eta \leq 1$ );  $\tau$  – постоянная

времени поляризационного процесса (время релаксации);  $c$  – показатель степени, определяющий ширину экспоненциального спектра переходной характеристики ВП ( $0 \leq c \leq 1$ ).

Параметр стационарной поляризуемости  $\eta$  определяется следующим образом:

$$\eta = \frac{\rho_0 - \rho_\infty}{\rho_0}, \quad (2)$$

где  $\rho_0$  и  $\rho_\infty$  – асимптотические, то есть предельные значения УЭС на нулевой (поле пропускания) и бесконечно большой частоте.

В программе «Mars1D» заданы четыре фоновых модели и четыре модели с наличием поляризующегося слоя (таблица).

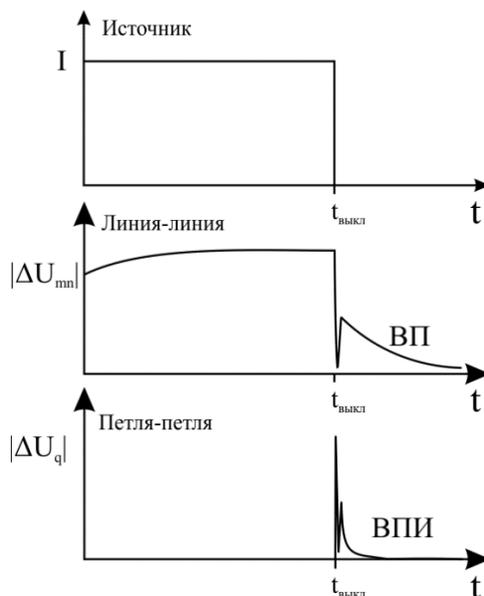
Данные модели являются сильно упрощенными и обобщенными моделями разрезов с объектами медно-колчеданного (модели 1, 3) и медно-порфинового (модели 2, 4) типов. Объекты медно-колчеданного типа характеризуются в основном более низкими значениями УЭС в сравнении со вмещающими породами, тогда как объекты медно-порфинового типа обычно не выделяются по УЭС. Параметры Cole-Cole для поляризующегося слоя: параметр стационарной поляризуемости  $\eta$  – 90 % (коэффициент – 0,9), время релаксации  $\tau$  – 10 с, показатель степени  $c$  – 0,5.

Также заданы две установки: с источником и приемником в виде незаземленных контуров («петля-петля») и заземленных диполей («линия-линия») (рис. 2).

Размеры сторон установки «петля-петля» составляют 100 м для генераторной петли Q и 25 м для приемной петли q. Размеры установки «линия-линия» – 400 м для генераторной линии АВ и 25 м для приемной линии MN. В первом случае установка соосная, во втором – срединного градиента.

<sup>6</sup> Жданов М.С. Электроразведка: учебник для вузов. М.: Недра, 1986. 316 с.

<sup>7</sup> Пушкарев П.Ю., Яковлев А.Г., Яковлев А.Д. Программа решения прямой и обратной одномерной задачи метода частотных зондирований. М., 1999. 13 с.

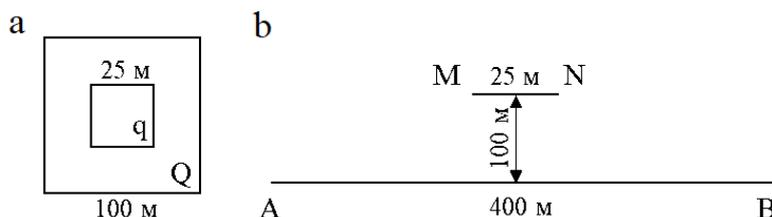


**Рис. 1. Форма регистрируемых сигналов над поляризуемой средой установками «линия-линия» и «петля-петля»**  
**Fig. 1. Signals shape registered above the polarized medium by the "line-line" and "loop-loop" configurations**

**Заданные свойства в рамках модели Cole-Cole**  
**Preset properties within the Cole-Cole model**

Номер слоя	Мощность слоя <i>h</i> , м	Удельное электрическое сопротивление $\rho$ , Ом·м	Стационарная поляризуемость $\eta$	Время релаксации $\tau$ , с	Показатель степени $s$
1	10	100	0	0	0
2	<i>40 (модель 1,2) / 340 (модель 3,4)</i>	500			
3	20	<i>50 (модель 1, 3) / 500 (модель 2, 4)</i>	0,9	10	0,5
4	$\infty$	3000	0		

*Примечание.* Курсивом обозначены параметры, изменяющиеся в рамках различных моделей.  
*Note.* The parameters that change depending on the model are italicized.



**Рис. 2. Геометрия заданных установок:**  
*a – установка «петля-петля»; b – установка «линия-линия»*  
**Fig. 2. Geometry parameters of the preset installations:**  
*a – "loop-loop" configuration; b – "line-line" configuration*

Расчеты проводились для тока, равного 1 А, времени импульса и паузы – 1 с, кривые выгружены в значениях мВ/А.

**Результаты исследования**

Ниже приведены расчеты прямых задач для моделей 1 и 2 (рис. 3). По

модельным представлениям кривых видно, что уровень кривой с наличием в среде ВП для гальванической установки сильно выше и имеет другой знак (см. рис. 3, а), в то время как для индукционной установки смена знака происходит на



2,4–2,5 мс для модели 1 и 0,7–0,8 мс для модели 2 (см. рис. 3, b).

При увеличении глубины залегания поляризующегося слоя картина изменяется не сильно (рис. 4). С увеличением глубины в кривых, рассчитанных от гальванической установки, появляется переход через ноль на ~0,3 мс (см. рис. 4, a) как для модели 3, так и для модели 4; для индукционной установки – 11 мс для модели 3 и 9,3–9,4 мс для модели 4 (см. рис. 4, b).

Далее для анализа аномального отклика был произведен расчет аномального вклада абсолютного (3) и относительного (4), после чего были рассчитаны медианные оценки для диапазонов времен 0,01–0,1; 0,1–1; 1–10; 10–100; 100–500 мс (рис. 5).

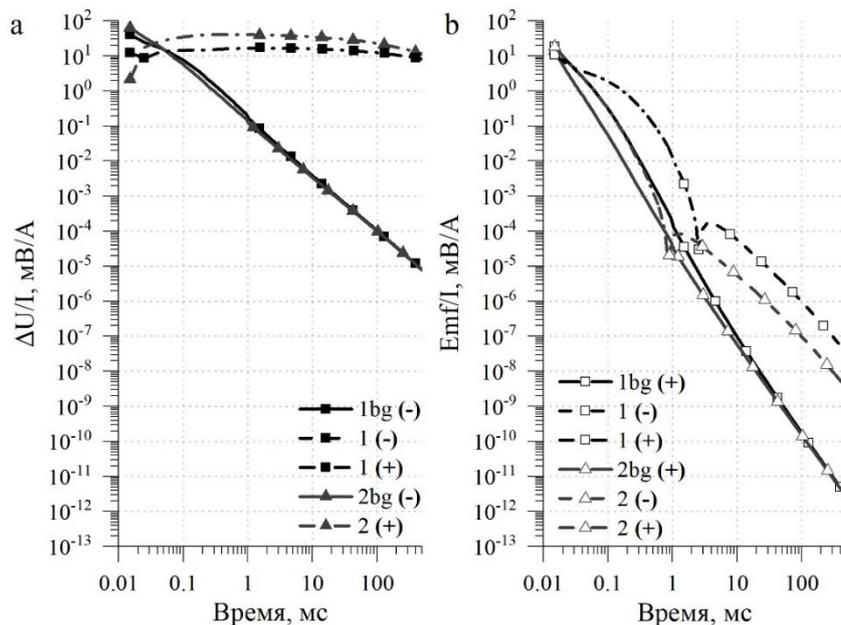
$$AAC = |x(t) - y(t)|; \quad (3)$$

$$RAC = \left| \frac{x(t) - y(t)}{x(t)} \right| \cdot 100\%, \quad (4)$$

где AAC – абсолютный аномальный вклад, выраженный в заданных едини-

цах; RAC – относительный аномальный вклад, выраженный в процентах;  $x(t)$  – значения модельной кривой, рассчитанной от исходной модели;  $y(t)$  – значения модельной кривой, рассчитанной от модели с поляризацией;  $t$  – время.

Относительные аномальные вклады ВП и ВПИ (см. рис. 5, a) возрастают со временем для всех моделей, что логично, так как со временем вклад индукции падает. Относительный вклад ВПИ от модели 1 выше вклада ВП на диапазонах 0,01–0,1 и 0,1–1 мс. Для индукционной установки можно отметить, что относительный вклад ВПИ выше от моделей 2 и 4 (медно-порфиновый тип), чем от моделей 1 и 3 (медно-колчеданный тип), что может свидетельствовать о том, что вклад ВПИ выше, когда поляризующийся объект обладает более низкими УЭС, чем вмещающие породы. Для гальванической установки относительный вклад выше от модели 2, чем 1, что может говорить о противоположной ситуации,



**Рис. 3. Сравнение кривых зондирования, рассчитанных в рамках моделей 1 и 2 для установок:**

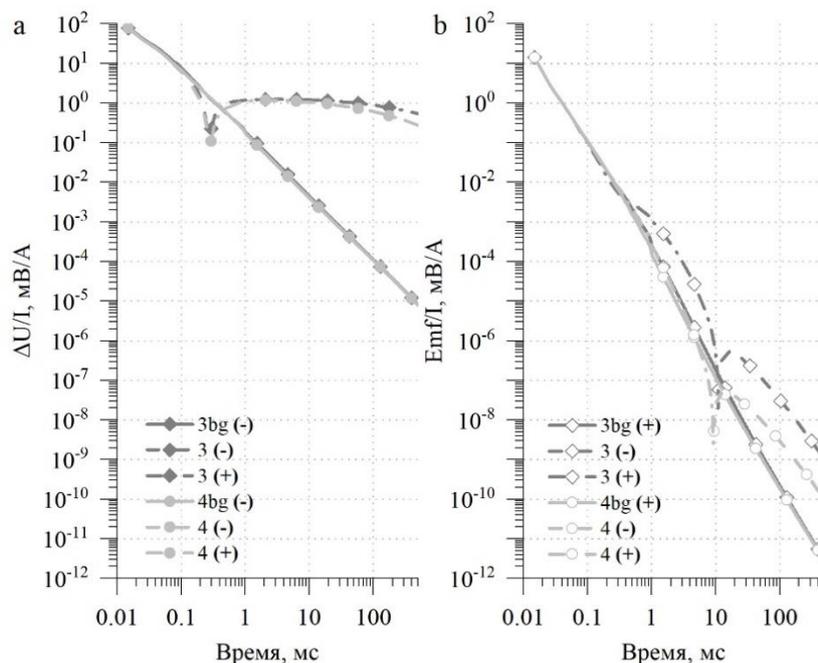
a – «линия-линия»; b – «петля-петля»

1bg – фоновая модель 1; 1 – модель 1; 2bg – фоновая модель 2; 2 – модель 2  
 (+) – значения кривой положительны; (-) – значения кривой отрицательны

**Fig. 3. Comparison of sounding curves calculated in the model 1 and 2 for configurations:**

a – “line-line”; b – “loop-loop”

1bg – background model 1; 1 – model 1; 2bg – background model 2; 2 – model 2  
 (+) – curve values above zero; (-) – curve values below zero



**Рис. 4. Сравнение кривых зондирования, рассчитанных в рамках моделей 3 и 4 для установок:**

*a* – «линия-линия»; *b* – «петля-петля»

*3bg* – фоновая модель 3; *3* – модель 3; *4bg* – фоновая модель 4; *4* – модель 4  
(+) – значения кривой положительны; (-) – значения кривой отрицательны

**Fig. 4. Comparison of sounding curves calculated in the model 3 and 4 for configurations:**

*a* – “line-line”; *b* – “loop-loop”

*3bg* – background model 3; *3* – model 3; *4bg* – background model 4; *4* – model 4  
(+) – curve values above zero; (-) – curve values below zero

если бы не результаты моделирования от моделей 3 и 4.

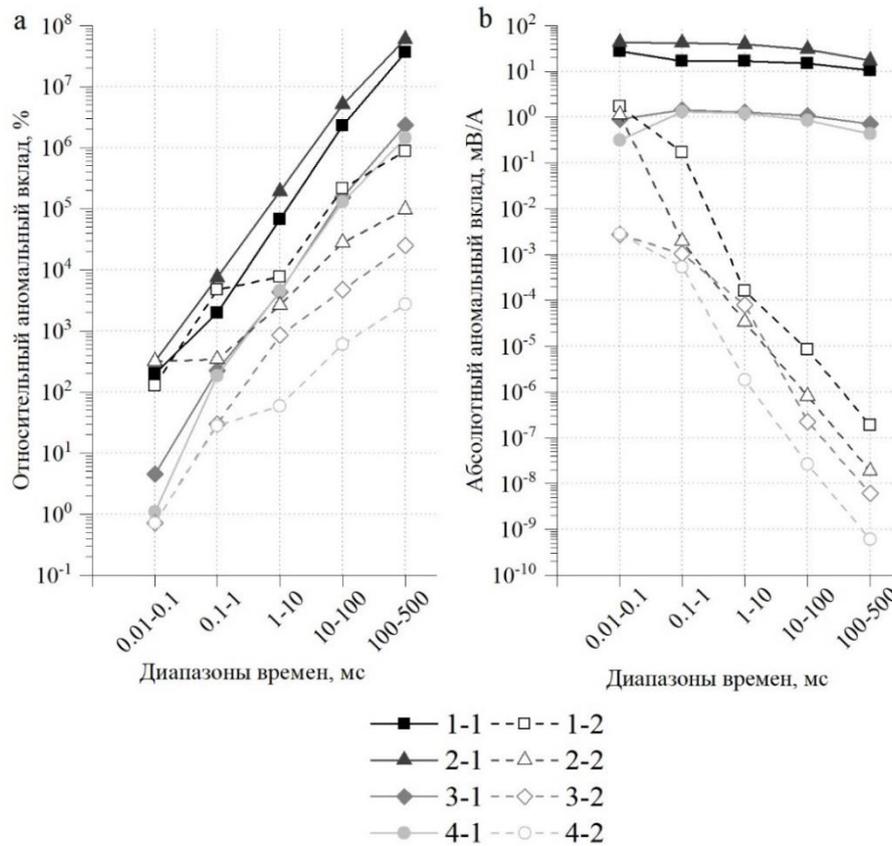
Абсолютные вклады показывают, что вклады ВП спадают намного медленнее, чем вклады ВПИ (см. рис. 5, *b*). Аномальные вклады ВПИ для моделей 1 и 3 (медно-колчеданный тип) больше аналогичных для моделей 2 и 4 (медно-порфировый тип). Вклады ВП в абсолютных значениях показывают примерно те же результаты, что и в относительных единицах, то есть вклад от модели 1 меньше вклада от модели 2, а вклад от модели 3 больше вклада от модели 4.

Общий вклад ВПИ в кривую зондирования для всех моделей на временном диапазоне 0,01–0,1 мс составляет первые проценты, тогда как на поздних временах (100–500 мс) данные значения вырастают вплоть до  $10^6$  %, хотя в абсолютных значениях оно составляет примерно  $10^{-7}$  мВ/А. Ситуация по общему вкладу

ВП несколько другая. Рассмотрим общий вклад на примере расчетов от модели 3 (медно-колчеданный тип на глубине 340 м): на диапазоне времен 0,01–0,1 мс относительный вклад составляет примерно 4 %, в абсолютных – примерно 0,8 мВ/А, на диапазоне 100–500 мс в относительных –  $2 \cdot 10^6$  %, а в абсолютных – 0,7 мВ/А, что сильно не отличается от аналогичного значения на начальных временах, то есть можно сделать вывод, что влияние ВП (по модулю) на кривую зондирования со временем изменяется не сильно.

### Заключение

Результаты численного моделирования в рамках одномерных горизонтально-слоистых моделей с частотной дисперсией УЭС, описываемой формулой Cole-Cole, показали, что при использовании гальванической установки вклад ВП больше, чем при использовании



**Рис. 5. Медианные оценки аномальных вкладов для всех моделей по диапазонам времен:**

*a* – относительные аномальные вклады; *b* – абсолютные аномальные вклады

Вклады: 1-1 – вызванной поляризации в модель 1; 1-2 – индукционно-вызванной поляризации в модель 1;  
 2-1 – вызванной поляризации в модель 2; 2-2 – индукционно-вызванной поляризации в модель 2;  
 3-1 – вызванной поляризации в модель 3; 3-2 – индукционно-вызванной поляризации в модель 3;  
 4-1 – вызванной поляризации в модель 4; 4-2 – индукционно-вызванной поляризации в модель 4

**Fig. 5. Anomalous responses median estimates for all models over time ranges**

*a* – relative anomalous responses; *b* – absolute anomalous responses

Responses: 1-1 – induced polarization, model 1; 1-2 – inductive-induced polarization, model 1;  
 2-1 – induced polarization, model 2; 2-2 – inductive-induced polarization, model 2;  
 3-1 – induced polarization, model 3; 3-2 – inductive-induced polarization, model 3;  
 4-1 – induced polarization, model 4; 4-2 – inductive-induced polarization, model 4

индукционной установки. Также в абсолютных значениях вклад ВП со временем спадает значительно медленнее, не более чем на один порядок, тогда как при индукционной установке вклад ВПИ стремительно уменьшается – примерно на 8 порядков (в  $10^8$  раз).

Небольшие значения абсолютных аномальных вкладов ВПИ в относительных величинах достигают  $10^6$  % на поздних временах спада. Следовательно, эффекты ВПИ необходимо учитывать при решении обратных задач для установки с

индукционным возбуждением, иначе значения УЭС, особенно нижних слоев, будут неминуемо искажены.

Для более точных результатов необходимо провести численное моделирование в рамках трехмерных моделей, так как в рамках одномерных моделей аномальный поляризующийся слой имеет бесконечно большие размеры по простиранию в то время, как реальные объекты достаточно локальны и их вклад в процессы становления и ВП во многом определяется влиянием геометрического фактора.



## Библиографический список

1. Ваньян Л.Л. Электромагнитные зондирования. М.: Научный мир, 1997. 219 с.
2. Поспеев А.В., Буддо И.В., Агафонов Ю.А., Кожевников Н.О. Выделение пластов-коллекторов в разделе осадочного чехла юга сибирской платформы по данным зондирования становлением электромагнитного поля в ближней зоне // Геофизика. 2010. № 6. С. 47–52.
3. Стогний В.В., Коротков Ю.В. Поиск кимберлитовых тел методом переходных процессов. Новосибирск: Малотиражная типография 2D, 2010. 121 с.
4. Шарлов М.В., Буддо И.В., Мисюркева Н.В., Шелохов И.А., Агафонов Ю.А. Опыт эффективного изучения верхней части разреза методом зондирования становлением поля в ближней зоне с системой FastSnap // Приборы и системы разведочной геофизики. 2017. № 2 (60). С. 8–23.
5. Стогний В.В. Импульсная индуктивная электроразведка при изучении поляризующейся среды криолитозоны Якутской кимберлитовой провинции // Криосфера Земли. 2008. Т. 12. № 4. С. 46–56.
6. Vanhala H., Peltoniemi M. Spectral IP studies of Finnish ore prospects // Geophysics. 1992. Vol. 57 (12). P. 1545–1555.
7. Агеев В.В. Изучение процессов вызванной поляризации для решения геокриологических задач // Разведка и охрана недр. 2012. № 11. С. 46–49.
8. Кожевников Н.О., Антонов Е.Ю. Импульсная индуктивная электроразведка поляризующихся сред // Геофизический журнал. 2009. Т. 31. № 4. С. 104–118.
9. Кожевников Н.О. Быстропротекающая индукционно-вызванная поляризация в мерзлых породах // Геология и геофизика. 2012. Т. 53. № 4. С. 527–540.
10. Комаров В.А. О природе электрических полей вызванной поляризации и возможности их использования при поисках рудных месторождений // Вестник Ленинградского университета. Геология и география. 1957. № 6. С. 29–40.
11. Легейдо П.Ю., Мандельбаум М.М., Рыхлинский Н.И. Применение дифференциально-нормированной электроразведки на Непском своде // Геология и геофизика. 1990. № 4. С. 86–91.
12. Легейдо П.Ю., Мандельбаум М.М., Рыхлинский Н.И. Дифференциально-нормированный метод электроразведки при прямых поисках залежей // Геофизика. 1995. № 4. С. 42–45.
13. Давыденко Ю.А., Айкашева Н.А., Башкеев А.С., Фаустова А.Ю., Богданович Д.В. Результаты применения импульсной электроразведки при поиске месторождений рудных полезных ископаемых на горном Алтае // Инженерная и рудная геофизика 2018: сб. стат. XIV науч.-практ. конф. и выставки (г. Алматы, 23–27 апреля 2018 г.). 8 с. [Электронный ресурс]. URL: <http://www.earthdoc.org/publication/publicationdetail/s/?publication=91717> (03.09.2019).
14. Башкеев А.С., Давыденко Ю.А. Архитектура аппаратно-программного электроразведочного комплекса «Марс» // Вопросы естествознания. 2016. № 3 (11). С. 35–43.
15. Рыжов А.А. Оптимальный алгоритм решения прямой задачи ВЭЗ // Физика Земли. 1983. № 3. С. 68–76.
16. А. с. № 2012660743, Российская Федерация. Программа одномерной инверсии «Mars1D» / И.Ю. Пестерев. Заявл. № 2012618705 от 16.10.2012; зарег. 28.11.2012.
17. Cole K.S., Cole R.H. Dispersion and absorption in dielectrics. Alternating current characteristics // Journal of Chemical Physics. 1941. Vol. 9. P. 341–351.
18. Pelton W.H., Ward S.H., Hall of P.G., Sill W.R., Nelson P.H. Mineral discrimination and removal of inductive coupling with multifrequency IP // Geophysics. 1978. Vol. 43. P. 588–609.

## References

1. Van'yan LL. Electromagnetic sounding. Moscow: Nauchnyi mir; 1997. 219 p. (In Russ.)
2. Pospeev AV, Buddo IV, Agafonov YuA, Kozhevnikov NO. Reservoir identification in the sedimentary cover of South of Siberian platform with the use of non-stationary electromagnetic soundings data. *Russian Geophysics*. 2010;6:47–52. (In Russ.)
3. Stognii VV, Korotkov YuV. *Prospecting for kimberlite bodies by the transient electromagnetic method*. Novosibirsk: Malotirazhnaya tipografiya 2D; 2010. 121 p. (In Russ.)
4. Sharlov MV, Buddo IV, Misyurkeeva NV, Shelokhov IA, Agafonov YuA. Experience of effective study of the upper part of the section by near-field transient electromagnetic sounding method with FastSnap system. *Devices and systems of Exploration Geophysics*. 2017;2(60):8–23. (In Russ.)
5. Stognii VV. Transient electromagnetic prospecting on investigations of induced polarization effects in frozen ground of Yakutian kimberlite province. *Kriosfera Zemli = Earth cryosphere*. 2008;12(4):46–56. (In Russ.)
6. Vanhala H, Peltoniemi M. Spectral IP studies of Finnish ore prospects. *Geophysics*. 1992;57(12):1545–1555.
7. Ageev VV. Induced polarization processes study for geocryological tasks solution. *Prospect and protection of mineral resources*. 2012;11:46–49. (In Russ.)



8. Kozhevnikov NO, Antonov EYu. Pulse-inductive electrical exploration of polarized media. *Geofizicheskiy zhurnal = Geophysical Journal*. 2009;31(4):104–118. (In Russ.)

9. Kozhevnikov NO. Fast-decaying inductive IP in frozen ground. *Russian Geology and Geophysics*. 2012;53(4):527–540. (In Russ.)

10. Komarov VA. On the nature of induced-polarization electric fields and the possibility of their use in prospecting ore deposits. *Vestnik Leningradskogo universiteta. Geologiya i geografiya = Bulletin of the Leningrad University. Geology and geography*. 1957;6:29–40. (In Russ.)

11. Legeido PYu, Mandel'baum MM, Rykhinskiy NI. The use of differential-normalized electrical exploration in the Nepa arch. *Russian Geology and Geophysics*. 1990;4:86–91. (In Russ.)

12. Legeido PYu, Mandel'baum MM, Rykhinskiy NI. Differentially normalized electrical survey method in direct exploration for deposits. *Russian Geophysics*. 1995;4:42–45. (In Russ.)

13. Davydenko YuA, Aikasheva NA, Bashkeev AS, Faustova AYu, Bogdanovich DV. Results of the pulse electrical survey application in prospecting ore mineral deposits in the mountainous Altai.

*Inzhenernaya i rudnaya geofizika 2018: sbornik statei XIV nauchno-prakticheskoi konferentsii i vystavki = Engineering and mining geophysics in 2018: 14th Science-to-practice conference and exhibition*, 23–27 April 2018, Almaty. 8 p. Available from: <http://www.earthdoc.org/publication/publicationdetails/?publication=91717> [Accessed 3d September 2019].

14. Bashkeev AS, Davydenko YuA. The “Mars” electromagnetic hardware-software complex architecture. *Voprosy estestvoznaniya = Natural Science Questions*. 2016;3(11):35–43. (In Russ.)

15. Ryzhov AA. The optimal algorithm for solving the direct problem of VES. *Fizika Zemli = Earth Physics*. 1983;3:68–76. (In Russ.)

16. Pesterev IYu. *One-dimensional inversion program “Mars1D”*. Certificate of authorship RF, no. 2012660743; 2012. (In Russ.)

17. Cole KS, Cole RH. Dispersion and absorption in dielectrics. Alternating current characteristics. *Journal of Chemical Physics*. 1941;9:341–351.

18. Pelton WH, Ward SH, Hallof PG, Sill WR, Nelson PH. Mineral discrimination and removal of inductive coupling with multifrequency IP. *Geophysics*. 1978;43:588–609.

#### Критерии авторства / Authorship criteria

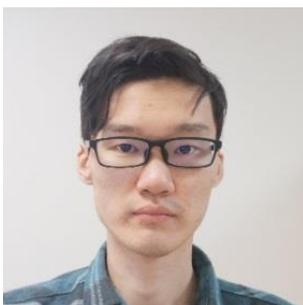
Башкеев А.С. написал статью, имеет на нее авторские права и несет ответственность за плагиат.  
Aiur S. Bashkeev is the author of the article, holds the copyright and bears responsibility for plagiarism.

#### Конфликт интересов / Responsibility for plagiarism

Автор заявляет об отсутствии конфликта интересов.

The author declares that there is no conflict of interest regarding the publication of this article.

#### Сведения об авторе / Information about the author



##### **Башкеев Аюр Саянович,**

ассистент кафедры прикладной геологии,  
геофизики и геоинформационных систем,  
младший научный сотрудник научно-исследовательской части,  
Иркутский национальный исследовательский технический университет,  
664074, г. Иркутск, ул. Лермонтова, 83, Россия,

✉ e-mail: bashkeev.as@gmail.com

##### **Aiur S. Bashkeev,**

Assistant, Department of Applied Geology,  
Geophysics and Geoinformation Systems,  
Junior Researcher, Research Division,  
Irkutsk National Research Technical University,  
83, Lermontov St., Irkutsk, 664074, Russia,

✉ e-mail: bashkeev.as@gmail.com



Оригинальная статья / Original article  
УДК 550.379

## Использование одномерной и трехмерной инверсии для определения поляризационных параметров рудных тел на Горном Алтае

© С.В. Бухалов<sup>a</sup>, А.Ю. Белова<sup>b</sup>, Ю.А. Давыденко<sup>c</sup>

<sup>a,b,c</sup>Иркутский национальный исследовательский технический университет, г. Иркутск, Россия

<sup>a,b,c</sup>ООО «Гелиос», г. Иркутск, Россия

<sup>c</sup>Институт земной коры СО РАН, г. Иркутск, Россия

**Резюме:** Цель данной статьи заключается в исследовании полиметаллического рудопроявления на Горном Алтае, выполненном в условиях естественного залегания с помощью микроустановок (измерительных установок с малым шагом) для качественного определения геоэлектрических характеристик рудных тел. Для определения геоэлектрических характеристик рудопроявления изучаемая среда возбуждалась последовательностью разнополярных импульсов тока в генераторном диполе, а электромагнитное поле регистрировалось приемной линией по технологии электромагнитного зондирования и вызванной поляризации. Для построения моделей среды применялась инверсия нестационарных электромагнитных полей в рамках одномерных и трехмерных моделей с учетом эффекта вызванной поляризации. Зоны с аномальными поляризационными характеристиками, полученные в результате одномерной инверсии, коррелируют с зонами повышенного содержания серебра и меди, установленными при детальном геохимическом опробовании канавы. В процессе трехмерного моделирования использовались граничные условия, когда геометрия рудных тел задавалась по геологическому разрезу, а их свойства – по данным одномерной инверсии. В результате нескольких итераций аномалии поляризационных параметров пространственно совпадали с положением рудных тел на геологическом разрезе. Расположенная за пределами электроразведочного профиля аномалия времени релаксации соответствует известной рудной жиле, которая не задавалась в начальном приближении, что говорит о высокой чувствительности технологии электромагнитного зондирования и вызванной поляризации к поляризационным характеристикам среды. Исследование микроустановками рудопроявлений с сульфидной минерализацией позволяет получать информацию о поляризационных характеристиках, пространственном положении, угле падения и размере рудных объектов. Данный подход может использоваться в процессе комплексной интерпретации геолого-геофизических данных площадных электромагнитных зондирований, поставленных с целью выявления перспективных рудопроявлений и оптимизации поискового бурения и горных работ.

**Ключевые слова:** электромагнитные зондирования, вызванная поляризация, сульфидная минерализация, одномерная инверсия, трехмерная инверсия

**Благодарности:** Авторы признательны коллегам из ОСП «Горно-Алтайская экспедиция» за предоставление материалов и содействие в работе: Д.А. Шмойлову (директор), Ю.А. Сморокову (начальник геофизического отряда), С.И. Федаку (главный геолог), Ю.А. Фалалееву (ведущий геолог Ишинской партии). Работа выполнена при поддержке базовой части государственного задания Министерства образования и науки РФ № 13.7232.2017/8.9.

**Информация о статье:** Дата поступления 1 августа 2019 г.; дата принятия к печати 27 августа 2019 г.; дата онлайн-размещения 30 сентября 2019 г.

**Для цитирования:** Бухалов С.В., Белова А.Ю., Давыденко Ю.А. Использование одномерной и трехмерной инверсии для определения поляризационных параметров рудных тел на Горном Алтае. *Науки о Земле и недропользование*. 2019. Т. 42. № 3. С. 312–323.



# One-dimensional and three-dimensional inversions in evaluating the ore bodies' polarization parameters in the Altai Mountains

© Sergei V. Bukhalov<sup>a</sup>, Anastasia Y. Belova<sup>b</sup>, Yuri A. Davydenko<sup>c</sup>

<sup>a,b,c</sup>Irkutsk National Research Technical University, Irkutsk, Russia

<sup>a,b,c</sup>Gelios, Ltd., Irkutsk, Russia

<sup>c</sup>Institute of the Earth's Crust SB RAS, Irkutsk, Russia

**Abstract:** The purpose of the work is to study natural-mode polymetallic ore occurrences in the Altai Mountains using microinstallations (small-step measuring devices) for a qualitative evaluation of the ore bodies' geoelectric characteristics. To evaluate the ore bodies' geoelectric characteristics, the investigated medium was excited by a sequence of multidirectional current pulses in a generator dipole, and the electromagnetic field was registered by the receiving line by the technique of electromagnetic sounding and induced polarization. For the purposes of the medium modeling, an inversion of the non-stationary electromagnetic fields was applied within one-dimensional and three-dimensional models with the account of the induced polarization effect. The zones with anomalous characteristics that were obtained with the one-dimensional inversion, correlate with the high silver- and copper-content zones defined by the means of the detailed geochemical sampling of the ditch. The three-dimensional modeling process used the following border conditions: the geometry of the ore bodies was set by the geological section, and their properties, by the one-dimensional inversion data. The polarization parameter anomalies obtained after several iterations have shown a spatial coincidence with the ore bodies position on the geological section. The relaxation time anomaly that is beyond the electrical survey profile corresponds to the known ore seam that had not been set in the initial approximation, which suggests a high sensitivity of the electromagnetic sounding and induced polarization technique to the polarization characteristics of the ore bodies. The study of the sulfide-mineralization ore bodies with the microinstallations provides information on the ore bodies' polarization characteristics, spatial position, angle of incidence, and size. The suggested approach can be used in the geological-geophysical interpretation of the areal electromagnetic sounding data to define promising ore occurrences and optimize the prospect drilling and mining.

**Keywords:** electromagnetic sounding, induced polarization, sulfide mineralization, one-dimensional inversion, three-dimensional inversion

**Acknowledgements:** We would like to thank our colleagues from Gorno-Altai Expedition JSC for their assistance: D. Shmoilov (Director), Smorokov Yu.A. (Head of the Geophysical Group), Fedak S.I. (Chief Geologist), Falaleev Yu.A. (Lead Geologist of the Ishinsky Geological Party). The work has been realized with the support of the base part of the Government Assignment of the Ministry of Education and Science of the Russian Federation №13.7232.2017/8.9.

**Information about the article:** Received August 1, 2019; accepted for publication August 27, 2019; available online September 30, 2019.

**For citation:** Bukhalov S.V., Belova A.Y., Davydenko Y.A. One-dimensional and three-dimensional inversions in evaluating the ore bodies' polarization parameters in the Altai Mountains. *Earth Sciences and Subsoil Use*. 2019;42(3):312–323. (In Russ.)

## Введение

Благодаря исследованиям поверхностных рудопоявлений в условиях естественного залегания при моделировании переходных процессов возможно определять геоэлектрические характеристики рудных тел и вмещающих пород. Использование данных характеристик позволяет существенно уменьшить неоднозначность в решениях обратных задач при моделировании площадных электромагнитных зондирований и выполнить

качественную геолого-геофизическую интерпретацию.

Целью исследования является определение качественных характеристик рудных тел в условиях естественного залегания по данным технологии электромагнитного зондирования и вызванной поляризации (ЭМЗ-ВП) [1] микроустановками с помощью инверсии данных в рамках одномерных и трехмерных моделей.



### Методы исследования

В работе использованы эмпирические и теоретические методы исследования. Эмпирическими методами являются измерение с помощью электромагнитных зондирований и сравнение результатов с геологическим очерком по результатам геохимического опробования и бурения. Теоретическими методами является моделирование горизонтально-слоистой среды через расчет прямой задачи геофизики и анализ полученных данных.

Использование методов вызванной поляризации (ВП), основанных на изучении процесса накопления заряда и его последующего распределения в породе под действием тока [2–4], позволяет вносить дополнительную характеристику для интерпретации электроразведочных данных. Природа вызванной поляризации – электрохимическая [5–8].

В методах ВП выделяют два вида измерений [9, 10]:

- измерения во временной области;
- измерения в частотной области.

Во временной области измеряется спад электрического поля после выключения тока, представляющего собой разнополярный импульс [11]. В частотной области для возбуждения в породах вторичных электрических полей ВП используют меандр, то есть разнополярные импульсы тока без пауз [12].

Для моделирования методов ВП используются феноменологические модели. Наиболее используемой является модель частотной дисперсии Cole-Cole [13–18], которая хорошо работает в рамках одномерной горизонтально-слоистой среды. При моделировании данных во временной области используется аналог формулы Cole-Cole, описанный В.В. Кормильцевым в 1989 г. [19]. Измерения, рассмотренные в данной работе, производились во временной области.

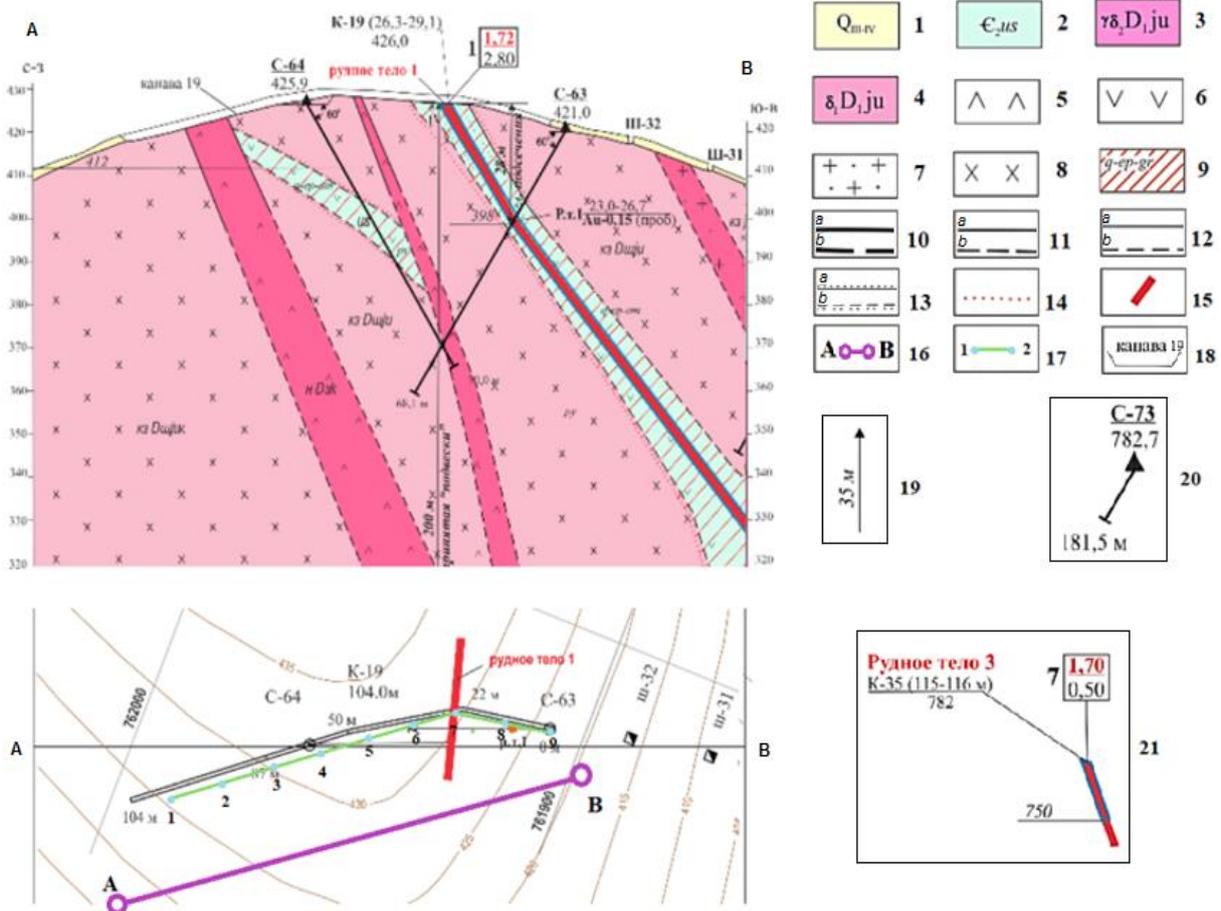
В рамках полевых работ с АО «Горно-Алтайская экспедиция» с октября 2015 г. по технологии ЭМЗ-ВП были проведены площадные геофизические изыскания на участке Туравитый [20], который

находится на территории Чойского административного района в северо-восточной части Республики Алтай. С целью качественного определения геоэлектрических характеристик рудопоявлений на участке работ микроустановками были произведены исследования объекта, представляющего собой канаву ручной и бульдозерной проходки длиной 103 м с выходом рудной жилы, содержащей сульфидную минерализацию. Для этого по всей длине канавы была заземлена приемная линия в рудное тело длиной 96 м. Шаг между электродами составил 12 м, длина питающей линии – 107,5 м (рис. 1).

В геологическом смысле (см. рис. 1) канава № 19 представляет собой вскрытые метасоматически измененные, неравномерно пиритизированные, пятнами и линзами эпидотизированные, окварцованные и скарнированные алевролиты и песчаники, прорванные телами гранит-порфиоров, пиритизированных кварцевых диоритов и диоритов (см. рис. 1). В южной части канавы в интервале 0–30 м на контакте с диоритами вскрыты метасоматически измененные песчаники, по результатам изучения шлифов представленные метасоматитами КПШ-актинолит-эпидотового состава, местами с примесью биотита и амфибола, в которых по результатам анализов установлены сплошь повышенные содержания золота до 0,1 г/т, серебра – до 0,7 г/т и меди – до 200 г/т, слегка повышенные значения свинца, цинка и кобальта. В двух пробах по пробирному анализу содержания золота составили 0,13 и 0,18 г/т, в интервале 26,3–29,1 м – 3,66 и 0,46 г/т. Средневзвешенное содержание золота на мощность 2,8 м составило 1,72 г/т (рудное пересечение первого рудного тела № 1). По результатам приближенно-количественного спектрального анализа (ПКСА) содержания в рудной пробе серебра – 1,7 г/т, меди – 640 г/т, в интервале 67–73,8 м в выветрелых диоритах и песчаниках на контакте с ними также установлены повышенные содержания золота



Геологический разрез по линии А-В (канавы 19 – скважины 63–64)



**Рис. 1. Геологический разрез канавы со схемой расположения приемной и питающей линий электромагнитного зондирования и вызванной поляризации и геохимического пробоотбора:**  
 1 – аллювиальные, аллювиально-делювиальные, озерно-аллювиальные озерно-болотные отложения: галечники, пески, глины, илы, суглинки; 2 – ускучуская свита; лавы и туфы андезитовых, базальтовых, порфиров, реже туффиты, туфобрекчи, прослои и пачки алевролитов, песчаников, гравелитов, конгломератов; 3 – вторая фаза – крупно-среднезернистые плагиограниты, гранодиориты, кварцевые диориты; зоны метасоматических изменений, скарны гранатовые, пироксен-гранатовые; 4 – первая фаза – мелкозернистые диориты, кварцевые диориты; зоны метасоматических изменений, скарны гранатовые, пироксен-гранатовые; 5 – дациты ( $\zeta$ ) (вулканические породы); 6 – андезиты ( $\alpha$ ) (вулканические породы); 7 – гранит-порфиры ( $\gamma \text{т}$ ) (интрузивные породы); 8 – диориты ( $\delta$ ) (интрузивные породы); 9 – метасоматиты, исходный состав пород, по которым они образовались, не определен (буквенные символы, определяющие состав метасоматитов, проставляются на фоне штриховки); 10 – разломы главные, выходящие на поверхность: достоверные (а) и предполагаемые (б); 11 – прочие разломы, выходящие на поверхность: достоверные (а) и предполагаемые (б); 12 – границы между разновозрастными подразделениями и телами разного состава внутри этих подразделений: достоверные (а) и предполагаемые (б); 13 – границы несогласованного залегания стратиграфических подразделений: достоверные (а) и предполагаемые (б); 14 – границы метасоматитов; 15 – выход рудного тела на поверхность под рыхлые отложения; 16 – питающая линия АВ электромагнитного зондирования и вызванной поляризации; 17 – приемная линия MN электромагнитного зондирования и вызванной поляризации; 18 – канавы, пройденные Ишинской партией, и их номера; 19 – глубина подсечения, величина интерполяции, экстраполяции рудного тела на глубину или «подвески» при расчете ресурсов; 20 – скважины, пробуренные Ишинской партией, в числителе – абсолютная отметка устья, м, в знаменателе – глубина скважины, м; 21 – рудное тело, его номер и номер пересечения: слева в числителе – номер выработки, в скобках – рудный интервал, выявленный по результатам анализов, в знаменателе – абсолютная отметка пересечения; в квадрате в числителе – среднее содержание золота по рудному пересечению по результатам пробирного анализа, в знаменателе – его горизонтальная мощность, м, слева – номер пересечения; синим цветом выделен контур подсчета ресурсов по рудному телу, цифра у нижней границы – абсолютная отметка нижней границы подсчета ресурсов



**Fig. 1. Geological section of the ditch with the scheme of the receiving and feeding lines of electromagnetic sounding and induced polarization, and geochemical sampling:**

1 – alluvial, alluvial-diluvium, lake-diluvium, lake-alluvial lake-bog sediments: pebble, sands, clay, slime, clay loams; 2 – uskuchusk suite; lava and tuff of the andesite and basalt porphyries; less often, tuffites, tuff breccia, interlayers and packs of siltstone, sandstone, gravelite and conglomerate units; 3 – second phase – coarse-to-medium-grain plagiogranites, granodiorites, quartz diorites; metasomatic transformation zones, garnet and pyroxene-garnet scars; 4 – first phase – fine-grain diorites, quartz diorites, metasomatic transformation zones, garnet and pyroxene-garnet scars; 5 – dacites ( $\zeta$ ) (volcanic rocks); 6 – andesites ( $\alpha$ ) (volcanic rocks); 7 – granite-porphyries ( $\gamma\pi$ ) (intrusive rocks); 8 – diorites ( $\delta$ ) (intrusive rocks); 9 – metasomatites, with the initial rock-forming structure undefined (letter symbols defining the metasomatites' structure are indicated against the crosshatch background); 10 – outcropping main faults: proved (a) and estimated (b); 11 – other outcropping faults: proved (a) and estimated (b); 12 – borders between the different-age units and different-structure bodies within the units: proved (a) and estimated (b); 13 – borders of the inconsistent occurrence of the stratigraphic units: proved (a) and estimated (b); 14 – borders of the metasomatites; 15 – ore body outcrop under the unconsolidated deposits; 16 – AB receiving line of electromagnetic sounding and induced polarization; 17 – MN receiving line of electromagnetic sounding and induced polarization; 18 – ditches driven by the Ishinsk party, and their numbers; 19 – undercutting depth, and the depth interpolation and extrapolation values of the ore body or 'hanging' when calculating the resources; 20 – wells drilled by the Ishinck party: in the numerator, an absolute heel mark,  $m$ ; in the denominator, the well depth; 21 – the ore body, its number and the intersection number: in the numerator on the left, the workings' number; in brackets, the ore interval defined by the analysis results; in the denominator, the absolute intersection mark; in the numerator (box), average gold content on the ore intersection by the assay analysis results, in the denominator, the body horizontal thickness,  $m$ ; on the left, the intersection number; in the blue color, the contour of the resources calculation for the ore body, the figure at the lower border, the absolute mark of the lower border of the resources calculation

по сокращенному химическому анализу (СХА) от 0,03 до 0,15 г/т, по пробирному – до 0,24 г/т (П13). Полный список химических элементов, выделенных с помощью геохимического пробоотбора по всей длине канавы выглядит следующим образом: Ag, As, B, Ba, Be, Bi, Cd, Co, Cr, Cu, Ge, Hg, Mn, Mo, Ni, Pb, Sb, Sn, Sr, V, W, Zn.

### Результаты исследования

Одномерная инверсия выполнена в рамках поляризационной модели Cole-Cole [13], описывающей процессы ВП с точки зрения частотной дисперсии электрического сопротивления среды:

$$\rho(\omega) = \rho_0 \left\{ 1 - \eta \left[ 1 - \frac{1}{1 + (i\omega\tau)^c} \right] \right\},$$

где  $\rho$  – удельное электрическое сопротивление (УЭС);  $\rho_0$  – сопротивление на постоянном токе;  $i$  – мнимая единица;  $\omega$  – круговая частота;  $\eta$  – коэффициент поляризуемости среды ( $0 \leq \eta \leq 1$ );  $\tau$  – постоянная времени поляризационного процесса (время релаксации);  $c$  – показатель степени, определяющий ширину экспоненциального спектра переходной характеристики ВП ( $0 \leq c \leq 1$ ).

При инверсии использовалась горизонтально-слоистая поляризующая модель, состоящей из двух слоев (таблица).

В процессе инверсии менялись параметры только первого слоя, при этом мощность данного слоя была закреплена, в то время как параметры второго опорного высокоомного слоя оставались неизменными. Результат моделирования кривых переходных процессов с высокими и низкими значениями поляризуемости представлен на графике (рис. 2). Данные по УЭС и поляризуемости для разных значений силы тока при измерениях были осреднены вынесены на график (рис. 3) вместе с данными по геохимическому опробованию и анализу металлов серебра и меди.

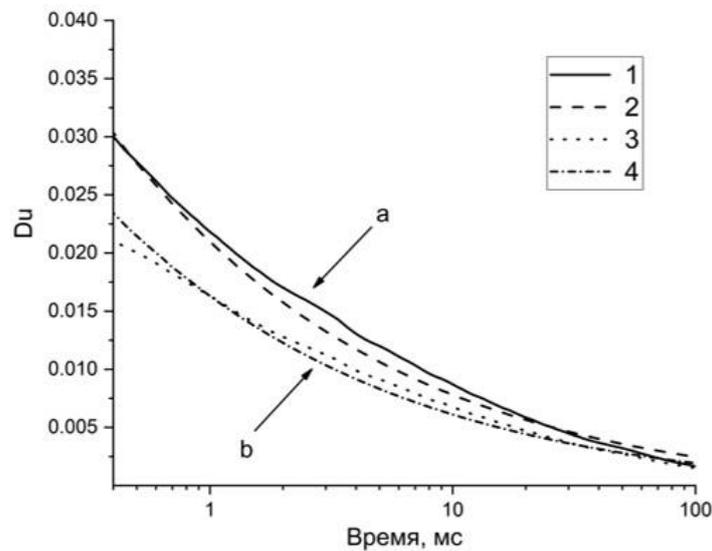
Изменения параметров сопротивления и поляризационных характеристик, наблюдаемых в направлении падения рудной жилы к концу профиля (после 70 м), объясняются повышением сульфидной минерализации. Угол падения тела невозможно однозначно определить, анализируя результаты инверсии, выполненной в рамках одномерной модели. Дело в том, что в реальной геологической обстановке может меняться не только угол падения рудных тел, но и свойства вмещающей среды, что существенно расширяет рамки неопределенности.



**Параметры модели, полученные при подборе кривой с высокой поляризацией и используемые для подбора всех остальных кривых на профиле**  
**Model parameters obtained when choosing a high-polarization curve and used in choosing all other curves on the profile**

Номер слоя	Удельное электрическое сопротивление $\rho$ , Ом·м	Коэффициент поляризуемости среды $\eta$ , %	Время релаксации $\tau$ , с	Показатель степени $C$	Мощность слоя $H$ , м
1	490,295	68,18	5E-05	0,47	1
2	<i>10000</i>	<i>0</i>	<i>0,01</i>	<i>0,5</i>	$\infty$

*Примечание.* Курсивом выделены закрепленные параметры модели.  
*Note.* The model fixed parameters are italicized.



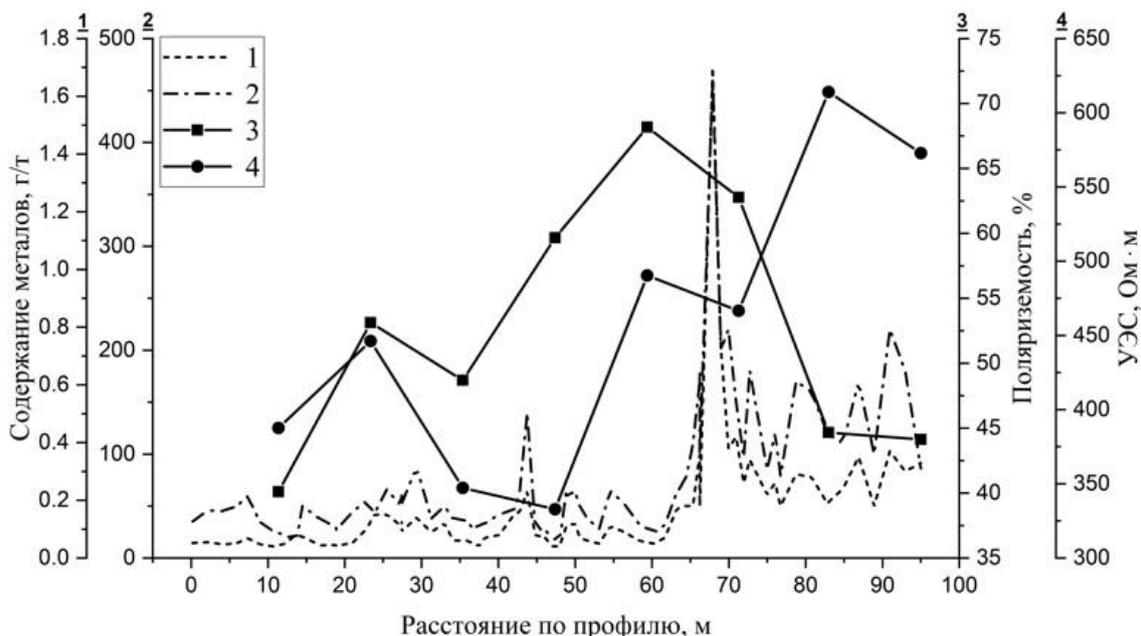
**Рис. 2. Наблюдаемые и модельные кривые с высокими и низкими параметрами поляризуемости:**  
1 – наблюдаемая кривая с высокой поляризуемостью; 2 – модельная кривая с высокой поляризуемостью;  
3 – наблюдаемая кривая с низкой поляризуемостью; 4 – модельная кривая с низкой поляризуемостью;  
a – значение параметра поляризации Cole-Cole – 68,7 %, среднеквадратическое отклонение – 10,2 %;  
b – значение параметра поляризации Cole-Cole – 40,3 %, среднеквадратическое отклонение – 9,4 %

**Fig. 2. Observed and model curves with high and low polarization parameters**  
1 – observed curve with high polarization; 2 – model curve with high polarization;  
3 – observed curve with low polarization; 4 – model curve with low polarization;  
a – polarization parameter value Cole-Cole – 68.7 %, standard deviation – 10.2 %;  
b – polarization parameter value Cole-Cole – 40.3 %, standard deviation – 9.4 %

Улучшения качества интерпретации можно достичь при использовании трехмерного моделирования электроразведочных данных. Трехмерное моделирование представляет собой инверсию с использованием конечно-элементного подхода для решения прямых и обратных задач в горизонтально-слоистой среде. Трехмерная инверсия осуществлялась в программном комплексе ИТЕМ-IP. Математический аппарат, лежащий в основе этого программного комплекса, и

алгоритм инверсии представлены в работах [21–23].

При выполнении трехмерной инверсии были заданы граничные условия, когда свойства вмещающей среды и рудных объектов определялись по результатам решения одномерной обратной задачи, а априорная геологическая информация использовалась для геометризации объектов. В пределах профиля съемки в несколько итераций было подобрано распределение УЭС, при этом



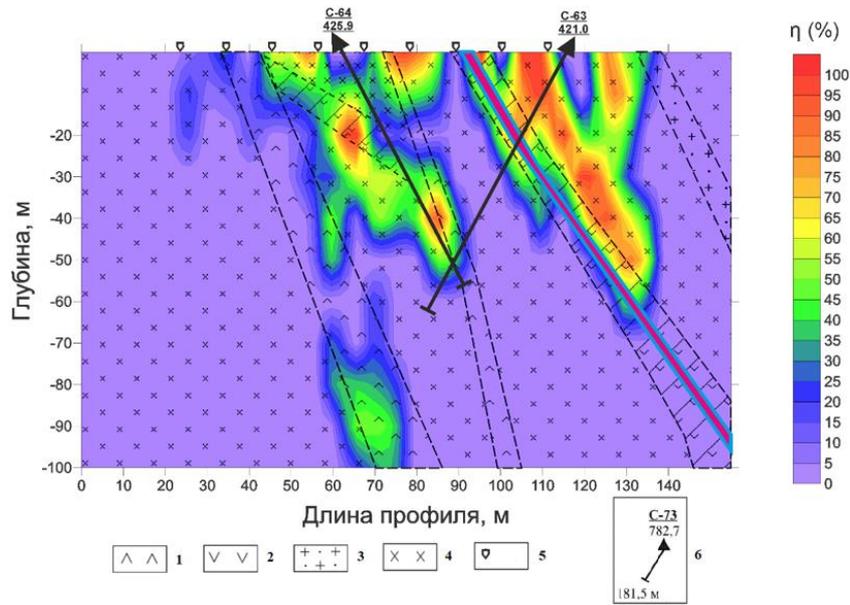
**Рис. 3. Концентрация, г/т, серебра и меди в канаве геохимического профиля с параметрами удельного электрического сопротивления и поляризуемости по всей длине канавы: 1 – серебро; 2 – медь; 3 – поляризуемость, полученная при расчете через Cole-Cole модель; 4 – удельное электрическое сопротивление, полученное при расчете через Cole-Cole модель**  
**Fig. 3. Concentration of silver and copper in the geochemical profile ditch with the electrical resistivity and polarization parameters along the full length of the ditch, g/m: 1 – silver; 2 – copper; 3 – polarization obtained by the calculation using the Cole-Cole model; 4 – electrical resistivity obtained by the calculation using the Cole-Cole model**

жилам задавались высокие значения (1–5 кОм), а поляризационные параметры (поляризуемость, время релаксации и параметр  $B$ , отвечающий за форму спада кривой) определялись автоматически. По результатам трехмерного моделирования было получено устойчивое решение, отражающее распределение поляризационных характеристик на глубину. Аномалии по поляризуемости совпали с контурами рудных тел и соответствуют геологическим представлениям о строении участка (рис. 4). В процессе выполнения трехмерного моделирования граничные условия были заданы только в пределах линии профиля, записанного микроустановками. Тем не менее за пределами профиля съемки по разрезу времени релаксации был выявлен аномалиеобразующий объект (рис. 5) в месте, где по результатам геологической съемки и буровых работ закартирован выход гранитпорфиров. Параметры времени релаксации также являются критериями разделе-

ния рудных объектов при изучении процессов ВП [24, 25]. Аномальные значения поляризуемости рудопроявлений подтверждены бурением и горными выработками (скважина № 64), что позволяет на качественном уровне разделять рудопроявления на перспективные и мало-перспективные и использовать данный подход при последующей интерпретации площадных съемок электромагнитных зондирований.

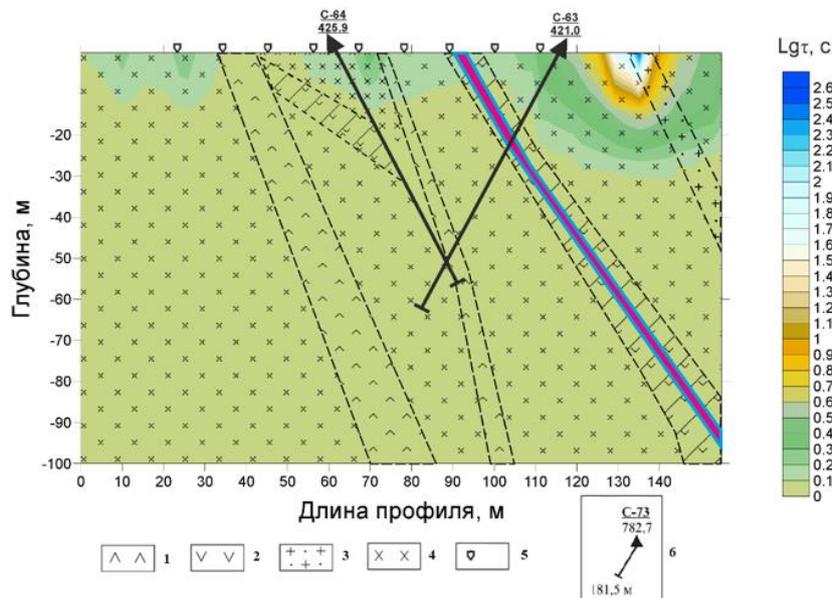
### Заключение

Результаты детальных исследований микроустановками в естественном залегании, проведенные на эталонном участке Ишинской площади, позволяют говорить о высокой чувствительности технологии ЭМЗ-ВП к определению УЭС и поляризационных характеристик рудных тел. Наблюдается высокая корреляция сульфидной минерализации с поисковыми электроразведочными параметрами (УЭС, поляризуемость и время релаксации). Применение трехмерного



**Рис. 4. Геоэлектрический разрез по поляризуемости, полученный в результате 3D-инверсии данных электромагнитного зондирования и вызванной поляризации:**  
 1 – дациты ( $\zeta$ ) (вулканические породы); 2 – андезиты ( $\alpha$ ) (вулканические породы);  
 3 – гранит-порфиры ( $\gamma\pi$ ) (интрузивные породы); 4 – диориты ( $\delta$ ) (интрузивные породы);  
 5 – пикеты приемной линии MN электромагнитного зондирования и вызванной поляризации;  
 6 – скважины, пробуренные Ишинской партией, в числителе – абсолютная отметка устья, м,  
 в знаменателе – глубина скважины, м

**Fig. 4. Geoelectric section by polarization obtained by the 3D inversion of the electromagnetic sounding and induced polarization data:**  
 1 – dacites ( $\zeta$ ) (volcanic rocks); 2 – andesites ( $\alpha$ ) (volcanic rocks);  
 3 – granite-porphyrates ( $\gamma\pi$ ) (intrusive rocks); 4 – diorites ( $\delta$ ) (intrusive rocks);  
 5 – stakes of the MN receiving line of electromagnetic sounding and induced polarization;  
 6 – wells drilled by the Ishinsk party: in the numerator, the absolute heel mark, m;  
 in the denominator, the well depth, m



**Рис. 5. Геоэлектрический разрез по времени релаксации, полученный в результате 3D-инверсии данных электромагнитного зондирования и вызванной поляризации:**  
 1 – дациты ( $\zeta$ ) (вулканические породы); 2 – андезиты ( $\alpha$ ) (вулканические породы);  
 3 – гранит-порфиры ( $\gamma\pi$ ) (интрузивные породы); 4 – диориты ( $\delta$ ) (интрузивные породы);  
 5 – пикеты приемной линии MN электромагнитного зондирования и вызванной поляризации;  
 6 – скважины, пробуренные Ишинской партией, в числителе – абсолютная отметка устья, м,  
 в знаменателе – глубина скважины, м

**Fig. 5. Geoelectric section by relaxation time obtained by the 3D inversion of the electromagnetic sounding and induced polarization data:**

- 1 – dacites ( $\zeta$ ) (volcanic rocks); 2 – andesites ( $\alpha$ ) (volcanic rocks);  
3 – granite-porphyrines ( $\gamma\pi$ ) (intrusive rocks); 4 – diorites ( $\delta$ ) (intrusive rocks);  
5 – stakes of the MN receiving line of electromagnetic sounding and induced polarization;  
6 – wells drilled by the Ishinsk party: in the numerator, the absolute heel mark,  $m$ ;  
in the denominator, the well depth,  $m$

моделирования для данных ЭМЗ-ВП позволяет получать информацию об относительном положении, угле падения и размере рудных объектов. Данная методика по определению поляризационных и геометрических параметров рудных тел может использоваться для определения качественной характеристики рудопро-

явлений и выявления бедной или богатой минерализации. В результате существенно повысится качество геолого-геофизической интерпретации площадных данных электромагнитных зондирований, что позволит оптимизировать программу поискового бурения и горных работ.

**Библиографический список**

1. Пат. № 2574861, Российская Федерация. Способ измерения и обработки переходных процессов с заземленной линией при импульсном возбуждении поля электрическим диполем с целью построения геоэлектрических разрезов и устройство для осуществления этого способа с помощью аппаратно-программного электроразведочного комплекса (АПЭК «МАРС») / Ю.А. Давыденко, А.Ю. Давыденко, И.Ю. Пестерев, С.В. Яковлев, М.А. Давыденко, А.В. Комягин, Д.М. Шимянский. Заявл. 01.08.2012; опублик. 10.02.2016.
2. Marshall D.J., Madden Th.R. Induced polarization, a study of its causes // *Geophysics*. 1959. Vol. 26. P. 790–816.
3. Гурин Г.В., Тарасов А.В., Ильин Ю.Т., Титов К.В. Оценка объемного содержания электропроводящих минералов по данным метода вызванной поляризации // *Вестник Санкт-Петербургского университета. Геология и география*. 2014. № 3. С. 4–19.
4. Bleil D.F. Induced polarization, a method of geophysical prospecting // *Geophysics*. 1953. Vol. 18. P. 636–661.
5. Постельников А.Ф. К вопросу о природе вызванной поляризации в осадочных горных породах // *Геология и разведка*. 1959. Vol. 2. P. 126–136.
6. Постельников А.Ф. О природе и механизме образования вызванной поляризации на образцах электропроводящих горных пород // *Труды Центрального научно-исследовательского горноразведователя института*. 1964. № 59. С. 153–164.
7. Bhattacharyya B., Morrison H. Some theoretical aspects of electrode polarization in rocks // *Geophysical Prospecting*. 1963. Vol. 11 (2). P. 62–72.
8. Семенов А.С. Электроразведка методом естественного электрического поля. Л.: Недра, 1980. 446 с.
9. Sumner J.S. Principles of induced polarization for geophysical exploration. Amsterdam: Elsevier, 1976. 277 p.
10. Titov K., Gurin G., Tarasov A., Akulina K. Spectral induced polarization: frequency domain versus time domain // *3rd International Workshop on Induced Polarization (6–9 April)*. Oléron Island, France, 2014. P. 78–79.
11. Flis M.F., Newman G.A., Hohmann G.W. Induced-polarization effects in time-domain electromagnetic measurements // *Geophysics*. 1989. Vol. 54 (4). P. 514–523.
12. Куликов А.В., Шемякин Е.А. Электроразведка фазовым методом вызванной поляризации. М.: Недра, 1978. 157 с.
13. Cole K.S., Cole R.H. Dispersion and absorption in dielectrics. Alternating current characteristics // *Journal of Chemical Physics*. 1941. Vol. 9 (4). P. 341–351.
14. Pelton W.H., Ward S.H., Hallof P.G., Sill W.R., Nelson P.H. Mineral discrimination and removal of inductive coupling with multifrequency IP // *Geophysics*. 1978. Vol. 43. P. 588–609.
15. Персова М.Г., Соловейчик Ю.Г., Вагин Д.В., Домников П.А. Сравнение различных подходов к численному моделированию трехмерных полей вызванной поляризации // *Доклады Академии наук высшей школы Российской Федерации*. 2011. № 2. С. 123–139.
16. Tarasov A., Titov K. Relaxation time distribution from time domain induced polarization measurements // *Geophysical Journal International*. 2007. Vol. 170. P. 31–43.
17. Fiandaca G., Auken E., Gazoty A., Christiansen A.V. Time-domain induced polarization: full-decay forward modeling and 1D laterally constrained inversion of Cole-Cole parameters // *Geophysics*. 2012. Vol. 77. P. 213–225. <https://doi.org/10.1190/geo2011-0217.1>.



18. Fiandaca G. Line Meldgaard Madsen and Pradip Kumar Maurya. Re-parameterisations of the Cole-Cole model for improved spectral inversion of induced polarization data // *Near Surface Geophysics*. 2018. Vol. 16. P. 385–399. <https://doi.org/10.3997/1873-0604.2017065>.

19. Кормильцев В.В., Мезенцев А.Н. Электроразведка в поляризующихся средах. Свердловск: Изд-во УрО АН СССР, 1989. 128 с.

20. Давыденко Ю.А., Айкашева Н.А., Башкеев А.С., Фаустова А.Ю., Богданович Д.В. Результаты применения импульсной электроразведки при поиске месторождений рудных полезных ископаемых на горном Алтае // *Инженерная и рудная геофизика 2018*: сб. стат. XIV науч.-практ. конф. и выставки (г. Алматы, 23–27 апреля 2018 г.). 8 с. [Электронный ресурс]. URL: [http://www.earthdoc.org/publication/publicationdetails/?publication=91717\\_\(03.09.2019\)](http://www.earthdoc.org/publication/publicationdetails/?publication=91717_(03.09.2019)).

21. Persova M.G., Soloveichik Y.G., Trigubovich G.M. Computer modeling of geoelectromagnetic fields in three-dimensional media by the finite element method // *Izvestiya. Physics of the Solid Earth*. 2011. Vol. 47. № 2. P. 79–89.

22. Persova M.G., Soloveichik Y.G., Tokareva M.G., Trigubovich G.M. Methods and algo-

rithms for reconstructing three-dimensional distributions of electric conductivity and polarization in the medium by finite-element 3D modeling using the data of electromagnetic sounding // *Izvestiya. Physics of the Solid Earth*. 2013. Vol. 49. № 3. P. 329–343.

23. Белова А.Ю., Гуревич Д.В., Богданович Д.В., Айкашева Н.А., Башкеев А.С., Бухалов С.В. [и др.]. Поиск скрытых медно-молибденовых оруденений в Северном Казахстане с помощью технологии электромагнитного зондирования и вызванной поляризации (ЭМЗ-ВП) // *Инженерная и рудная геофизика 2019*: сб. стат. XV науч.-практ. конф. и выставки (г. Геленджик, 22–26 апреля 2019 г.). 11 с. [Электронный ресурс]. URL: [http://earthdoc.eage.org/publication/publicationdetails/?publication=96758\\_\(03.09.2019\)](http://earthdoc.eage.org/publication/publicationdetails/?publication=96758_(03.09.2019)).

24. Куликов В.А., Яковлев А.Г. Практическое применение временных (частотных) характеристик процесса вызванной поляризации для разделения аномалий от углефицированных пород и сульфидов // *Геофизика*. 2008. № 6. С. 55–59.

25. Куликов В.А., Зорин Н.И., Манжева И.Т., Яковлев А.Г. Разделение аномалий вызванной поляризации по частотным характеристикам дифференциального фазового параметра // *Геофизика*. 2013. № 6. С. 23–31.

## References

1. Davydenko YuA, Davydenko AYu, Pesterev IYu, Yakovlev SV, Davydenko MA, Komyagin AV, Shimyanskii DM. *Measurement and processing method for grounded-line transient processes under the pulse excitation of the field by an electric dipole for constructing geoelectric sections, and a device for the method implementation using the hardware-and-software electric prospecting complex (HSEPC "MARS")*. Patent RF, no. 2574861; 2016. (In Russ.)

2. Marshall DJ, Madden ThR. Induced polarization, a study of its causes. *Geophysics*. 1959;26:790–816.

3. Gurin GV, Tarasov AV, Il'in YuT, Titov KV. Ore volumetric content from induced polarization data. *Vestnik Sankt-Peterburgskogo universiteta. Geologiya i geografiya = Saint-Petersburg University Bulletin. Geology and Geography*. 2014;3:4–19. (In Russ.)

4. Bleil DF. Induced polarization, a method of geophysical prospecting. *Geophysics*. 1953;18:636–661.

5. Postel'nikov AF. On the nature of induced polarization in sedimentary rocks. *Geologiya i razvedka = Geology and Exploration*. 1959;2:126–136. (In Russ.)

6. Postel'nikov AF. On the nature and mechanism of induced polarization formation on the electron-conductive rock samples. *Trudy Tsentral'nogo nauchno-issledovatel'skogo gornorazvedovatel'nogo instituta = Proceedings of the Central Research Mining Prospecting Institute*. 1964;59:153–164. (In Russ.)

7. Bhattacharyya B, Morrison H. Some theoretical aspects of electrode polarization in rocks. *Geophysical Prospecting*. 1963;11(2):62–72.

8. Semenov AS. *Electrical survey by the self-potential method*. Leningrad: Nedra; 1980. 446 p. (In Russ.)

9. Sumner JS. *Principles of induced polarization for geophysical exploration*. Amsterdam: Elsevier; 1976. 277 p.

10. Titov K, Gurin G, Tarasov A, Akulina K. Spectral induced polarization: frequency domain versus time domain. *3rd International Workshop on Induced Polarization*, 6–9 April. Oléron Island, France; 2014. p.78–79.

11. Flis MF, Newman GA, Hohmann GW. Induced-polarization effects in time-domain electromagnetic measurements. *Geophysics*. 1989;54(4):514–523.

12. Kulikov AV, Shemyakin EA. *Electrical survey by the phase method of induced polarization*. Moscow: Nedra; 1978. 157 p. (In Russ.)

13. Cole KS, Cole RH. Dispersion and absorption in dielectrics. Alternating current characteristics. *Journal of Chemical Physics*. 1941;9(4):341–351.

14. Pelton WH, Ward SH, Hallof PG, Sill WR, Nelson PH. Mineral discrimination and removal of inductive coupling with multifrequency IP. *Geophysics*. 1978;43:588–609.

15. Persova MG, Soloveichik YuG, Vagin DV, Domnikov PA. Comparison of different numerical modeling approaches for three dimensional induced



polarization. *Proceedings of the Russian Higher School Academy of Sciences*. 2011;2:123–139. (In Russ.)

16. Tarasov A, Titov K. Relaxation time distribution from time domain induced polarization measurements. *Geophysical Journal International*. 2007;170:31–43.

17. Fiandaca G, Auken E, Gazoty A, Christensen AV. Time-domain induced polarization: full-decay forward modeling and 1D laterally constrained inversion of Cole-Cole parameters. *Geophysics*. 2012;77:213–225. <https://doi.org/10.1190/geo2011-0217.1>.

18. Fiandaca G. Line Meldgaard Madsen and Pradip Kumar Maurya. Re-parameterisations of the Cole-Cole model for improved spectral inversion of induced polarization data. *Near Surface Geophysics*. 2018;16:385–399. <https://doi.org/10.3997/1873-0604.2017065>.

19. Kormil'tsev VV, Mezentsev AN. *Electrical survey in polarizing media*. Sverdlovsk: Ural Branch of the Academy of Sciences of the USSR; 1989. 128 p. (In Russ.)

20. Davydenko YuA, Aikasheva NA, Bashkeev AS, Faustova AYU, Bogdanovich DV. The results of the pulse electrical survey application in prospecting for ore mineral deposits in the mountainous Altai. *Inzhenernaya i rudnaya geofizika 2018: sbornik statei 14 nauchno-prakticheskoi konferentsii i vystavki = Engineering and mining geophysics in 2018: collected works of the 14th Science-to-practice Conference and Exhibition, 23–27 April 2018*, Almaty. 8 p. Available from: <http://www.earthdoc.org/publication/publicationdetails/?publication=91717> [Accessed 3rd September 2019].

21. Persova MG, Soloveichik YG, Trigubovich GM. Computer modeling of geoelectromagnetic fields in three-dimensional media by the finite element method. *Izvestiya. Physics of the Solid Earth*. 2011;47(2):79–89.

22. Persova MG, Soloveichik YG, Tokareva MG, Trigubovich GM. Methods and algorithms for reconstructing three-dimensional distributions of electric conductivity and polarization in the medium by finite-element 3D modeling using the data of electromagnetic sounding. *Izvestiya. Physics of the Solid Earth*. 2013;49(3):329–343.

23. Belova AYU, Gurevich DV, Bogdanovich DV, Aikasheva NA, Bashkeev AS, Bukhalov SV, et al. Exploration for concealed copper-molybdenum ore deposits in Northern Kazakhstan using the techniques of electromagnetic sounding and induced polarization. *Inzhenernaya i rudnaya geofizika 2019: sbornik statei 15 nauchno-prakticheskoi konferentsii i vystavki = Engineering and Mining Geophysics 2019: collected works of the 15th Research-to-practice Conference and Exhibition, 22–26 April 2019*, Gelendzhik. 11 p. Available from: <http://earthdoc.eage.org/publication/publicationdetails/?publication=96758> [Accessed 3rd September 2019].

24. Kulikov VA, Yakovlev AG. The use of induced polarization time/frequency characteristics for carbonized and sulfide rock anomalies determination. *Russian Geophysics*. 2008;6:55–59. (In Russ.)

25. Kulikov VA, Zorin NI, Manzheeva IT, Yakovlev AG. Using of differential phase parameter (DPP) for IP anomalies separation. *Russian Geophysics*. 2013;6:23–31.

#### Критерии авторства / Authorship criteria

Бухалов С.В., Белова А.Ю., Давыденко Ю.А. написали статью, имеют равные авторские права и несут одинаковую ответственность за плагиат.

Sergei V. Bukhalov, Anastasia Y. Belova, Yury A. Davydenko are the authors of the article, hold equal copyright and bear equal responsibility for plagiarism.

#### Конфликт интересов / Responsibility for plagiarism

Авторы заявляют об отсутствии конфликта интересов.

The authors declare that there is no conflict of interest regarding the publication of this article.

#### Сведения об авторах / Information about the authors



**Бухалов Сергей Владимирович**, ассистент кафедры прикладной геологии, геофизики и геоинформационных систем, Иркутский национальный исследовательский технический университет, 664074, г. Иркутск, ул. Лермонтова, 83, Россия, инженер-геофизик, ООО «Гелиос», 664074, г. Иркутск, ул. Лермонтова, 83а, Россия, ✉ e-mail: xerorodger@yandex.ru



**Sergei V. Bukhalov,**

Assistant, Department of Applied Geology,  
Geophysics and Geoinformation Systems,  
Irkutsk National Research Technical University,  
83, Lermontov St., Irkutsk, 664074, Russia,  
Geophysicist,  
Gelios, Ltd,  
83a, Lermontov St., Irkutsk, 664074, Russia,  
✉ e-mail: xerorodger@yandex.ru



**Белова Анастасия Юрьевна,**

аспирант,  
Иркутский национальный исследовательский технический университет,  
664074, г. Иркутск, ул. Лермонтова, 83, Россия,  
инженер-геофизик,  
ООО «Гелиос»,  
664074, г. Иркутск, ул. Лермонтова, 83а, Россия,  
e-mail: bay@gelios-geo.com

**Anastasia Y. Belova,**

Postgraduate,  
Irkutsk National Research Technical University,  
83, Lermontov St., Irkutsk, 664074, Russia,  
Geophysicist,  
Gelios, Ltd,  
83a, Lermontov St., Irkutsk, 664074, Russia,  
e-mail: bay@gelios-geo.com



**Давыденко Юрий Александрович,**

кандидат технических наук,  
доцент кафедры прикладной геологии,  
геофизики и геоинформационных систем,  
Иркутский национальный исследовательский технический университет,  
664074, г. Иркутск, ул. Лермонтова, 83, Россия,  
ведущий инженер,  
Институт земной коры,  
664033, г. Иркутск, ул. Лермонтова, 128, Россия,  
генеральный директор,  
ООО «Гелиос»,  
664074, г. Иркутск, ул. Лермонтова, 83а, Россия,  
e-mail: davidenkoya@gmail.com

**Yury A. Davydenko,**

Cand. Sci. (Eng.),  
Associate Professor, Department of Applied Geology,  
Geophysics and Geoinformation Systems,  
Irkutsk National Research Technical University,  
83, Lermontov St., Irkutsk, 664074, Russia,  
Lead Engineer,  
Institute of the Earth's Crust, SB RAS,  
128, Lermontov St., Irkutsk, 664054, Russia,  
CEO,  
Gelios, Ltd,  
83a, Lermontov St., Irkutsk, 664074, Russia,  
e-mail: davidenkoya@gmail.com



Оригинальная статья / Original article  
УДК 622.831

## Естественное напряженно-деформированное состояние нижних горизонтов шахты Юго-Западная Дарасунского рудного поля

© А.Н. Авдеев<sup>а</sup>, Е.Л. Сосновская<sup>б</sup>, А.Ю. Болотнев<sup>с</sup>

<sup>а,б</sup>Институт горного дела УрО РАН, г. Екатеринбург, Россия

<sup>с</sup>Иркутский национальный исследовательский технический университет, г. Иркутск, Россия

**Резюме:** Проведено исследование естественного напряженно-деформированного состояния нижних горизонтов шахты Юго-Западная Дарасунского месторождения с целью уточнения геомеханических условий для обеспечения безопасности ведения горных работ. Летом 2019 г. заложена серия наблюдательных станций горного давления. Проведены натурные измерения по заложенным станциям методом щелевой разгрузки по методике Института горного дела УрО РАН в авторском варианте сегментированной щели. В местах заложения станций отобраны образцы горных пород для испытаний прочностных и упругих свойств в соответствии с требованиями стандартов Российской Федерации. Методом решения обратной геомеханической задачи по зафиксированным проявлениям горного давления в динамических формах реконструировано напряженное состояние массива горных пород в потенциально удароопасных участках массива горных пород шахты. Проведен расчет гравитационных и тектонических компонент поля природных напряжений. Проведен сравнительный анализ полученных результатов с ранее установленными для средних условий Дарасунского месторождения. По результатам исследований подтвержден гравитационно-тектонический характер естественного напряженно-деформированного состояния массива горных пород Дарасунского месторождения. Вместе с тем установлено, что поле природных напряжений дискретно рассредоточено: выделяются локальные участки повышенных тектонических напряжений с вероятностью проявления горного давления в динамических формах, средненапряженные участки без видимых проявлений горного давления и разгруженные участки приконтурного массива горных пород. Для инженерных геомеханических расчетов предложена дифференцированная оценка естественного напряженно-деформированного состояния. Напряжения рекомендуется рассчитывать в зависимости от конкретных горно-геологических условий на основе установленных зависимостей распределения природных напряжений.

**Ключевые слова:** естественное напряженно-деформированное состояние, массив горных пород, гравитационные и тектонические компоненты напряжения, физико-механические свойства горных пород, геомеханические условия, проявления горного давления в динамических формах

**Информация о статье:** Дата поступления 10 июля 2019 г.; дата принятия к печати 22 августа 2019 г.; дата онлайн-размещения 30 сентября 2019 г.

**Для цитирования:** Авдеев А.Н., Сосновская Е.Л., Болотнев А.Ю. Естественное напряженно-деформированное состояние нижних горизонтов шахты Юго-Западная Дарасунского рудного поля. *Науки о Земле и недропользование*. 2019. Т. 42. № 3. С. 324–335.

## Initial stress-strain state of the Yugo-Zapadnaya mine lower horizons (the Darasunsky deposit)

© Arkady N. Avdeev<sup>а</sup>, Elena L. Sosnovskaya<sup>б</sup>, Alexander Yu. Bolotnev<sup>с</sup>

<sup>а,б</sup>Mining Institute, the Ural Branch of the Russian Academy of Sciences, Yekaterinburg, Russia

<sup>с</sup>Irkutsk National Research Technical University, Irkutsk, Russia

**Abstract:** The article presents the study of the initial stress-strain state of the Yugo-Zapadnaya mine lower horizons, the Darasunsky gold deposit. The aim of the study has been to clarify the geotechnical conditions ensuring mining safety. A series of rock pressure monitoring stations have been installed, and in-situ measurements have been made using a slot discharge method based on the IGD UB RAS technique (segmented-slot version copyright). The rock samples taken at the stations' sites have been tested for their strength and elastic properties following the requirements of the standards of the Russian Federation. The inverse geo-mechanical problem-solution method based on the registered rock pressure manifestations has allowed reconstructing the stressed rock mass state in potentially bump-hazardous sections of the mine rock mass. The gravitational and tectonic components of the in-situ stress field have been calculated. The results have been compared with the ones previously obtained for the average conditions of the Darasunsky deposit. Based on the research results, the gravitational-tectonic nature of



the pre-mining stress-strain state of the rock mass of the Darasunsky field has been confirmed. At the same time, it has been found that the pre-mining stress field is discretely dispersed: there are localized high-stress areas where dynamic stress manifestation is probable, medium-stress areas without visible manifestations of rock pressure, and unloaded sections of the marginal rocks mass. For the engineering geotechnical calculation purposes, a differentiated assessment of the initial stress-strain state has been suggested. It is recommended that the stress be calculated for specific mining and geological conditions, based on the specified relations of the initial stress distribution.

**Keywords:** initial stress-strain state, rock mass, gravitational and tectonic stress components, physical and mechanical rock properties, geotechnical conditions, dynamic rock pressure manifestation

**Information about the article:** Received July 10, 2019; accepted for publication August 22, 2019; available online September 30, 2019.

**For citation:** Avdeev A.N., Sosnovskaya E.L., Bolotnev A.Yu. Initial stress-strain state of the Yugo-Zapadnaya mine lower horizons (the Darasunsky deposit). *Earth Sciences and Subsoil Use*. 2019;42(3):324–335. (In Russ.)

## Введение

При разработке месторождений подземным способом, особенно на больших глубинах, повышается вероятность вредных проявлений горного давления и горных ударов. Одной из основных причин данных проявлений является наличие в горных массивах высоконапряженных зон гравитационно-тектонических напряжений [1–4]. Необходимо учитывать, что горное давление может проявляться не повсеместно, а дискретно, с разной интенсивностью. В пределах одного месторождения могут быть зафиксированы как локальные участки повышенных природных напряжений, так и разгруженные области пониженных напряжений [5–7]. Поэтому для своевременного принятия мер безопасного ведения горных работ необходимо знать закономерности распределения естественного напряженно-деформированного состояния массива горных пород конкретного месторождения [8–10 и др.].

Дарасунское золоторудное месторождение разрабатывается подземным способом с 1930 г. Отрабатываются крутопадающие маломощные кварцевосульфидные жилы. Вмещающие породы – граниты, габбро- и гранодиориты, амфиболиты. Месторождение характеризуется сложной тектоникой: развиты многочисленные системы трещин, присутствуют зоны смятия и разрывов. На месторождении действуют гравитационно-тектонические первоначальные напряжения. Тектоническая составляющая естественных напряжений в среднем равняется -6,3...-16,6 МПа [11].

На месторождении с 1979 по 1991 г. было зафиксировано 36 случаев динамических проявлений горного давления в виде шелушения, «стреляния», заколообразования, толчков и микроударов. Тектоническая компонента природных напряжений на участках проявлений горного давления составляет в среднем - 40,5 МПа, что в 2,5–6,5 раза выше, чем на средненапряженных участках. На основании соответствующих исследований Иркутского научно-исследовательского института благородных и редких металлов и алмазов и Всесоюзного научно-исследовательского маркшейдерского института (Ленинград) в 1978 г. месторождение отнесено к опасным по горным ударам, начиная с глубины 330 м [12, 13].

За годы эксплуатации на Дарасунском месторождении добыто более 120 т рудного золота. С 1992 г. началось устойчивое снижение золотодобычи, и в 2000 г. добыча золота на Дарасунском месторождении прекратилась. В 2002 г. горные работы на руднике начали восстанавливаться, но в 2006 г. на руднике произошла техногенная катастрофа. В результате пожара, повлекшего за собой многочисленные человеческие жертвы, а также разрушение и последующее затопление значительной части выработок, горные работы были прекращены и в течение многих лет не велись. Работы на руднике возобновились только в 2017–2018 гг. В настоящее время осуществляются работы по осушению нижних горизонтов рудника. Дарасунское месторождение отрабатывалось шахтами Центральная, Восточная, Юго-Западная. На данный



момент на руднике повторно введен в эксплуатацию только участок шахты Юго-Западная. Глубина горных работ на руднике в 90-е гг. прошлого века достигла 700 м.

С целью обеспечения безопасности горных работ в процессе уточнения геомеханических условий на восстановленных эксплуатационных горизонтах авторами в 2019 г. были проведены исследования по оценке естественного напряженно-деформированного состояния нижних горизонтов шахты Юго-Западная Дарасунского рудного поля.

### Материал и методы исследований

Для объективной оценки поля естественных напряжений был использован комплекс методов, включающий лабораторные испытания прочностных и упругих свойств горных пород, натурные измерения природных напряжений, аналитический расчет природных напряжений по зафиксированным проявлениям горного давления, анализ гравитационно-тектонической структуры измеренных и расчетных напряжений.

*Лабораторные исследования прочностных и упругих свойств горных пород.* Модуль упругости, коэффициент Пуассона, плотность пород, необходимые для оценки естественного напряженно-деформированного состояния массива горных пород, определялись авторами на базе лаборатории геомеханики и физики горных пород Иркутского национального исследовательского технического университета. Испытания производились в соответствии с требованиями стандартов Российской Федерации на методы испытаний горных пород.

*Натурные измерения естественного напряженно-деформированного состояния массива.* Измерение напряжений массива горных пород производилось натурными измерениями щелевой разгрузкой по методике Института горного дела УрО РАН [14, 15] в авторском варианте сегментированной щели. Оценка действующего напряжения в элементе массива производилась путем

изменения его напряженного состояния проходкой щелей и измерения при этом соответствующих реакций в виде деформаций по распорным реперам, установленным перпендикулярно щелям. Напряжения, действующие на стенках выработок, вычислялись по формуле:

$$\sigma_{\perp} = \frac{U \cdot E \cdot \pi \cdot K_c}{8R - \pi l [1 - k_{\perp} + \mu \cdot k_{//}]},$$

где  $U$  – деформация участка после образования щели, см;  $E$  – модуль упругости массива горных пород, МПа;  $R$  – половина длины щели, см;  $l$  – расстояние между центрами отверстий для установки реперов, см;  $k_{\perp}$ ,  $k_{//}$  – значения коэффициентов концентрации напряжений в направлениях соответственно перпендикулярно и параллельно щели;  $\mu$  – коэффициент Пуассона;  $K_c$  – поправочный коэффициент перехода прочностных и упругих свойств от образца к массиву (коэффициент структурного ослабления).

В варианте щелевой разгрузки сегментированной щелью средний диаметр щели составляет 230 мм, глубина щели находится в диапазоне 50–70 мм; расстояние между центрами отверстий для установки реперов  $l = 9,5$ –10 см. Коэффициенты концентрации напряжений составят:  $k_{\perp} = 0,08$ ;  $k_{//} = 0,15$ . Коэффициент структурного ослабления для условий массива горных пород исследуемых горизонтов составит 0,51–0,65.

Переход от напряжений на стенках выработок к напряжениям, действующим в массиве горных пород, осуществлялся по формулам:

$$\sigma_B = \frac{\sigma_{B}^{Pi} - \sigma_{\Pi}^i \cdot K_{\Pi}}{K_{B(Pi)}};$$

$$\sigma_B = \frac{\sigma_B^{Pi} - \sigma_{PP}^i \cdot K_{PP}}{K_{B(\Pi)}};$$

$$\sigma_{PP} = \sigma_{PP}^i - \mu (\sigma_{Bcp}^{PP} - \sigma_{Bcp} - \sigma_{\Pi}^i);$$

$$\sigma_{\Pi} = \sigma_{\Pi}^i - \mu (\sigma_{Bcp}^{\Pi} - \sigma_{Bcp} - \sigma_{PP}^i),$$

где  $\sigma_B, \sigma_{PP}, \sigma_{\Pi}$  – вертикальные, продольные и поперечные первоначальные



напряжения, МПа;  $\sigma_{II}^i, \sigma_{II}^i$  – горизонтальные напряжения в расчетной точке, соответственно действующие вкрест простирания и по простиранию рудного тела, МПа;  $\sigma_B^{Pi}, \sigma_B^{Pi}$  – вертикальные напряжения в расчетной точке, соответственно действующие по простиранию и вкрест простирания рудного тела, МПа;  $K_{II}, K_{B(II)}, K_{II}, K_{B(II)}$  – коэффициенты концентрации напряжений;  $\sigma_{Bcp}$  – среднее значение вертикальных напряжений массива горных пород, МПа;  $\sigma_{Bcp}^{II}$  – среднее значение вертикальных напряжений, измеренных на стенке квершлага, МПа;  $\sigma_{Bcp}^{II}$  – среднее значение вертикальных напряжений, измеренных на стенке штофа, МПа.

Средние значения коэффициентов концентрации напряжений при используемом варианте щелевой разгрузки составляют:  $K_{B(II)}, K_{B(II)} = 1,91,$

$$K_{II}, K_{II} = -0,87.$$

*Оценка природных напряжений по проявлениям горного давления.* По зафиксированным проявлениям горного давления на основе решения обратной геомеханической задачи можно определять первоначальные природные напряжения по следующим зависимостям [11]:

$$\sigma_v = \gamma H;$$

$$\sigma_{np} = \frac{\sigma_{сж}^{об} \cdot K_{дин} - K_v \cdot \sigma_v}{K_{np}};$$

$$\sigma_n = \frac{\sigma_{сж}^{об} \cdot K_{дин} - K_v \cdot \sigma_v}{K_n},$$

где  $\sigma_v, \sigma_{np}, \sigma_n$  – первоначальные напряжения горного массива, соответственно вертикальные, продольные (горизонтальные, ориентированные по простиранию рудного тела), поперечные (горизонтальные, ориентированные вкрест простирания рудного тела), МПа;  $\sigma_{сж}^{об}$  – предел прочности горной породы на сжатие, в образце МПа;  $K_v, K_{np}, K_n$  – коэффици-

енты концентрации соответственно вертикального и горизонтального продольного и поперечного напряжений на контуре выработки в месте проявления горного давления (стенки, почва, кровля, углы);  $K_{дин}$  – коэффициент удароопасности, зависящий от формы проявления горного давления.

Коэффициент удароопасности  $K_{дин}$  зависит от формы проявления горного давления и принимается при трещинообразовании и обрушении отдельных блоков пород равным 0,5–0,6; при интенсивном заколообразовании, «шелушении», «стрелянии» – 0,7–0,8; при толчках, микроударах, собственно горных ударах – 0,8 и выше.

Коэффициенты концентрации техногенных напряжений на контуре удароопасной выработки определяются любыми известными методами моделирования, физическими или численными, с использованием оптических материалов, на основе решения граничных сингулярных уравнений [16, 17] или конечноэлементного анализа [18, 19]. В настоящих исследованиях коэффициенты концентрации приняты по результатам исследований профессора Л.И. Сосновского [3] и профессора А.В. Зубкова [15], полученным на основе оптического моделирования, а также по результатам исследования кандидата геолого-минералогических наук Е.Л. Сосновской [20], полученным на основе конечноэлементного анализа с помощью программного комплекса FEM, разработанного профессором О.В. Зотеевым (Институт горного дела УрО РАН).

*Анализ гравитационно-тектонической структуры природных напряжений.* Одним из существенных факторов, влияющих на удароопасность горных выработок, является действие в массиве значительной тектонической составляющей напряжений. Измеренные и расчетные напряжения можно разделить на гравитационные и тектонические составляющие на основе выражений [15]:



$$\begin{aligned}\sigma_{\phi}^{\phi} &= \sigma_{\phi}^z + \sigma_{\phi}^T; \\ \sigma_{np}^{\phi} &= \sigma_{np}^z + \sigma_{np}^T; \\ \sigma_n^{\phi} &= \sigma_n^z + \sigma_n^T,\end{aligned}$$

где  $\sigma_{\phi}^{\phi}, \sigma_{np}^{\phi}, \sigma_n^{\phi}$  – фактические измеренные вертикальные, продольные, поперечные напряжения горных пород, МПа;  $\sigma_{\phi}^z, \sigma_{np}^z, \sigma_n^z$  – гравитационные вертикальные, продольные, поперечные напряжения массива горных пород по А.Н. Диннику, МПа;  $\sigma_{\phi}^T, \sigma_{np}^T, \sigma_n^T$  – тектонические вертикальные, продольные, поперечные напряжения массива горных пород, МПа.

Гравитационные компоненты можно определить из зависимостей:

$$\begin{aligned}\sigma_B^{Tp} &= \gamma H; \\ \sigma_{\Gamma}^{Tp} &= \frac{\mu}{1-\mu} \gamma H,\end{aligned}$$

где  $\gamma$  – объемный вес пород, МН/м<sup>3</sup>;  $\mu$  – коэффициент Пуассона;  $H$  – глубина горных работ, м.

Тектонические составляющие напряжений после преобразования формулы можно вычислить из выражений:

$$\begin{aligned}\sigma_B^T &= \sigma_B^{\phi} - \gamma H; \\ \sigma_{\Gamma}^T &= \sigma_{\Gamma}^{\phi} - \frac{\mu}{1-\mu} \gamma H.\end{aligned}$$

Таким образом, используя фактические значения природных напряжений, полученных натурными измерениями или из решения обратной геомеханической задачи, а также зная глубину залегания выработок, в которых происходили измерения или были зафиксированы проявления горного давления, учитывая коэффициент Пуассона и объемный вес горных пород, можно определять степень влияния тектонических компонент массива горных пород на первоначальное поле напряжений.

### Результаты исследований

*Натурные измерения напряженно-деформированного состояния массива.* В июне 2019 г. на вновь эксплуатируемых горизонтах 507 и 617 м шахты Юго-

Западная с целью оценки естественного напряженно-деформированного состояния массива горных пород были заложены три наблюдательные станции горного давления. Глубина горных работ до земной поверхности в районе станций № 1 и 2 равна 617–620 м. Глубина горных работ в районе заложения станции № 3 составляет 550 м. Общее количество разгрузочных щелей по станции № 1 – 15 шт., по станции № 2 – 9 шт., по станции № 3 – 7 шт. Горные породы в районе заложения станций – амфиболиты, габбро, лейкократовые граниты. Прочностные и упругие характеристики горных пород, необходимые для расчетов деформаций и напряжений, приняты по результатам лабораторных испытаний физико-механических свойств пород, отобранных в районе заложения станций (табл. 1). Модуль упругости горных пород в образце составил 0,12–0,80 ГПа, коэффициент Пуассона – 0,15–0,31. Объемный вес пород – 0,027 МН/м<sup>3</sup>. Коэффициент структурного ослабления пород в районе заложения станций – 0,5–0,7. Следует отметить, что станции № 1 и 2 заложены в ранее затопленных горных выработках, которые в настоящее время находятся в обводненном, заиленном состоянии. Станция № 3, заложённая горизонтом выше станций № 1 и 2, находится в естественно-сухом состоянии, затоплению не подвергалась.

Следует отметить, что, так как результаты измерений по станциям № 1 и 2 практически совпадают, расположены сравнительно недалеко друг от друга (в пределах 400 м), результаты измерений по горизонту 617 м представилось возможным объединить для улучшения статистической достоверности результатов (табл. 2). По усредненным результатам произведен расчет тектонической компоненты поля естественных напряжений (табл. 3).

Сравнительный анализ результатов измерений на шахте Юго-Западная с ранее установленными закономерностями распределения природных



Таблица 1

**Основные характеристики  
наблюдательных станций горного давления**

Table 1

**Main characteristics of rock  
pressure monitoring stations**

Номер станции	1	2	3
Горизонт заложения станции, м	617	617	507
Глубина относительно земной поверхности, м	617	617	550
Количество разгрузочных щелей, шт.	15	9	7
Горные породы	Габбро	Лейкократовые граниты, амфиболиты	Амфиболиты
Модуль упругости в образце, ГПа	11,6	56,3	80,8
Коэффициент Пуассона	0,31	0,15	0,22
Средний размер структурного блока, м	0,55	0,55	0,30
Коэффициент структурного ослабления	0,65	0,65	0,51

Таблица 2

**Результаты натуральных измерений напряжений  
массива горных пород на шахте Юго-Западная**

Table 2

**Field measurement results for the initial rock  
mass stresses at the Yugo-Zapadnaya mine**

Напряжение	Глубина измерений, м	Результаты натуральных измерений напряжений горных массивов			
		Число единичных определений напряжения	Напряжение, МПа	Отношение продольного напряжения к вертикальному $K_{np} = \sigma_{np} / \sigma_v$	Отношение поперечного напряжения к вертикальному $K_n = \sigma_n / \sigma_v$
Горизонт 617 м					
Станция № 1					
Вертикальное	617	23	-16,8±2,1	0,7	0,6
Продольное		20	-11,7±1,3		
Поперечное		20	-10,2±3,8		
Станция № 2					
Вертикальное	617	9	-16,8±5,9	0,6	0,7
Продольное		9	-10,6±2,7		
Поперечное		9	-12,3±4,1		
Среднее по горизонту 617 м					
Вертикальное	617	61	-16,7±1,4	0,6	0,6
Продольное		47	-10,4±0,3		
Поперечное		47	-9,3±1,6		
Горизонт 507 м					
Станция № 3					
Вертикальное	550	5	-15,0±3	1	1,5
Продольное		6	-14,8±4,5		
Поперечное		6	-23,0±2,6		



Таблица 3

**Расчетные гравитационные и тектонические компоненты  
естественного напряженно-деформированного состояния  
массива горных пород шахты Юго-Западная**

Table 3

**Estimated gravitational and tectonic components of the initial  
stress-strain state of the Yugo-Zapadnaya mine rock mass**

Глубина горных работ, м	Расчетные напряжения массива пород, МПа					
	Вертикальные		Продольные		Поперечные	
	Гравитаци- онные $\sigma_g^z$	Тектониче- ские $\sigma_g^T$	Гравитаци- онные $\sigma_{np}^z$	Тектониче- ские $\sigma_{np}^T$	Гравитаци- онные $\sigma_n^z$	Тектониче- ские $\sigma_n^T$
550	-14,9	-0,1	-5,2	-9,6	-5,2	-17,8
617	-16,7	–	-5,8	-4,6	-5,8	-3,5

напряжений в массиве Дарасунского месторождения [10–13] позволяет отметить следующее.

Измерения напряжений на верхнем горизонте 507 м по станции № 3 подтверждают тот факт, что на месторождении в целом действуют гравитационно-тектонические напряжения. Вертикальные напряжения характеризуются действиями в основном веса налегающих пород. Максимальные напряжения действуют вкрест простирания рудных структур. Коэффициент поперечного бокового распора  $K_n$  составляет 1,5, коэффициент продольного бокового распора  $K_{np}$  – 1. Ранними исследованиями для условий рудника  $K_{np}$  был получен в диапазоне 0,3–1,3,  $K_n$  – в диапазоне 1,7–1,9 [11]. Тектоническая компонента продольных напряжений равна -9,6 МПа, компонента поперечных напряжений равна -17,8 МПа. Эти значения близки к полученным ранее на самых нижних горизонтах Центрального и Восточного участков Дарасунского рудного поля (-12,9 и -18 МПа соответственно). Таким образом, результаты измерений, полученные по станции № 3, согласуются с ранее установленными на Дарасунском месторождении зависимостями в пределах погрешности измерений. На горизонте 507 м однозначно установлен гравитационно-тектониче-

ский характер распределения естественных напряжений.

Результаты измерений по станциям № 1 и 2, расположенным на нижнем горизонте 617 м, несколько отличаются. Горизонтальные напряжения значительно меньше вертикальных. Коэффициент бокового распора как вкрест, так и по простиранию рудных жил практически одинаков и равен 0,6–0,7. Тектоническая компонента горизонтальных напряжений значительно меньше установленных ранее и находится в диапазоне -3,5...-4,6 МПа. Таким образом, поле природных напряжений здесь близко к гравитационной теории Динника. Можно сделать вывод, что массив горизонта 617 м находится в разгруженном состоянии.

Однако следует учитывать, что наблюдательные станции № 1, 2 заложены в ранее затопленных выработках. В настоящее время стенки выработок находятся в заиленном водонасыщенном состоянии. Очевидно, что тектоническая составляющая горизонтальных природных напряжений на этих участках снизилась в результате разгрузки трещин массива под действием длительного гидравлического напора. Можно заключить, что в инженерных расчетах устойчивости элементов геоконструкций при восстановлении шахты Юго-Западная потребуются районирование массива горных пород по



степени сохранности выработок на разгруженные участки гравитационных напряжений и гравитационно-тектонические, средненапряженные области.

*Оценка природных напряжений по проявлениям горного давления.* В начале января 2005 г. на ООО «Дарасунский рудник» была создана служба по прогнозированию и предотвращению горных ударов (СППГУ). По данным «Книги наблюдений за состоянием удароопасности выработок за 2005–2006 гг.», предоставленным службой СППГУ в 2005–2006 гг., на шахте Юго-Западная было зафиксировано 13 случаев динамических проявлений горного давления. Затем шахта была затоплена. После осушения горных выработок в 2019 г. на горизонтах 357, 407, 457, 507, 617 м службой СППГУ рудника признаков динамических проявлений удароопасности не наблюдалось.

По зафиксированным случаям произведен расчет первоначальных напряжений высоконапряженных удароопасных участков для условий шахты Юго-Западная на основе решения обратной геомеханической задачи. По результатам расчетов можно отметить следующее.

Коэффициент бокового распора на высоконапряженных участках равен: продольный – 2,9, поперечный – 2,5. Средний коэффициент бокового распора составляет 2,7. Это соотношение близко к установленному ранее по проявлениям горного давления на Центральном и Восточном участках рудника, равному 3 [11]. Отклонение не превышает погрешности расчетов.

Расчетная тектоническая составляющая продольных напряжений на удароопасных участках в среднем составляет -50 МПа, тектоническая составляющая поперечных напряжений в среднем равна -37,5 МПа (табл. 4). Средняя тектоническая составляющая на высоконапряженных участках шахты Юго-Западная равна -39,6 МПа. Это значение также близко к установленному ранее среднему значению тектонических напряжений на удароопасных участках, равному -40,5 МПа [11].

## Заключение

На Дарасунском месторождении в целом действуют гравитационно-тектонические напряжения. Вместе с тем поле природных напряжений носит дискретно-фрактальный характер: выделяются локальные высоконапряженные участки с вероятностью проявления горного давления в динамических формах вплоть до микроударов, средненапряженные участки без видимых проявлений горного давления и разгруженные участки приконтурного массива горных пород.

Натурными измерениями на шахте Юго-Западная в 2019 г. был установлен средненапряженный характер распределения природных напряжений на незатопленных участках шахты и разгруженный – на подвергшихся осушению ранее обводненных участках. Высоконапряженных зон на эксплуатируемых в настоящее время горизонтах 507–617 м визуальными наблюдениями и инструментальными замерами не зафиксировано. Прочностных свойств горных пород, отобранных для лабораторных испытаний в 2019 г., существенно меньше установленных более ранними исследованиями, что также свидетельствует о пониженной по сравнению со средними условиями рудника удароопасности. Однако следует учесть, что при дальнейшем понижении горных работ геомеханическая ситуация может измениться. Могут появиться локальные высоконапряженные участки, как те, которые наблюдались в 2005–2006 гг.

В связи с этим в качестве граничных условий при инженерных геомеханических расчетах для условий шахты Юго-Западная Дарасунского месторождения предлагается дифференцированная оценка естественного напряженно-деформированного состояния. Вертикальные напряжения рекомендуется оценивать от веса массива налегающих пород. Горизонтальные напряжения рекомендуется рассчитывать в зависимости от конкретных горно-геологических условий участка месторождения на основе



Таблица 4

Расчетные первоначальные напряжения, их гравитационные и тектонические компоненты по данным проявлений горного давления на шахте Юго-Западная в 2005–2006 гг.

Table 4

Estimated initial stress and its gravitational and tectonic components based on the records of the dynamic rock pressure manifestation at the Yugo-Zapadnaya mine in 2005–2006

Глубина проявлений, м	Первоначальные напряжения массива пород, МПа								
	Вертикальные			Горизонтальные продольные			Горизонтальные поперечные		
	$\sigma_e^\phi$	$\sigma_e^z$	$\sigma_e^T$	$\sigma_{np}^\phi$	$\sigma_{np}^z$	$\sigma_{np}^T$	$\sigma_n^\phi$	$\sigma_n^z$	$\sigma_n^T$
617	-16,7	-16,7	–	–	–	–	-31	-5,8	-25,2
717	-19,4	-19,4	–	-60,7	-6,8	-53,9	–	–	–
717	-19,4	-19,4	–	–	–	–	-67,5	-6,8	-60,7
667	-18	-18	–	–	–	–	-88,5	-6,3	-82,2
717	-19,4	-19,4	–	-52,8	-6,8	-46	–	–	–
617	-16,7	-16,7	–	–	–	–	-31	-5,8	-25,2
617	-16,7	-16,7	–	–	–	–	-31	-5,8	-25,2
717	-19,4	-19,4	–	–	–	–	-28,5	-6,8	-21,7
617	-16,7	-16,7	–	–	–	–	-31	-5,8	-25,2
617	-16,7	-16,7	–	–	–	–	-31	-5,8	-25,2
667	-18	-18	–	–	–	–	-51,4	-6,3	-45,1
667	-18	-18	–	–	–	–	-45,4	-6,3	-39,1
Средние значения	-17,9	-17,9	–	-56,8	-6,8	-50	-43,6	-6,2	-37,5

установленных закономерностей:

– в обводненных, разгруженных, в том числе по технологическим причинам (сближенные выработки, накопление подземных пустот), участках

$$\sigma_{np} = \sigma_n - \frac{\mu}{1 - \mu} \cdot \gamma H - 4;$$

– в естественно-влажном массиве, при отсутствии видимых проявлений горного давления, сближенных выработок и близкорасположенных подземных пустот большого объема

$$\sigma_{np} = -\frac{\mu}{1 - \mu} \cdot \gamma H - 9,6;$$

$$\sigma_n = -\frac{\mu}{1 - \mu} \cdot \gamma H - 17,8;$$

– в высоконапряженных участках с зафиксированными проявлениями горного давления

$$\sigma_{np} = \sigma_n = -\frac{\mu}{1 - \mu} \cdot \gamma H - 39,5.$$

Полученные результаты отражают знания о месторождении на сегодняшний день и по мере развития горных работ и накопления новых данных могут быть скорректированы.

#### Библиографический список

1. Brady B.H.G., Brown E.T. Rock mechanics for underground mining. Dordrecht: Springer, 2006. 628 p.
2. Jaeger J.C., Cook N.G.W. Fundamentals of rock mechanics. London: Chapman & Hall, 1979. 488 p.

3. Неганов В.П., Коваленко В.И., Зайцев Б.М., Казаченко Ю.А., Сосновский Л.И., Томилов В.Д. [и др.]. Технология разработки золоторудных месторождений / ред. В.П. Неганов. М.: Недра, 1995. 336 с.



4. Прогноз и предотвращение горных ударов на рудниках: коллективная монография / под общ. ред. И.М. Петухова, А.Н. Ильина, К.Н. Трубецкого. М.: Изд-во Академии горных наук, 1997. 377 с.

5. Сосновский Л.И., Филонюк В.А., Сосновская Е.Л. Механизм возникновения и закономерности пространственного распределения участков с относительно высокой и невысокой степенью естественной напряженности в горном массиве // Вестник Иркутского государственного технического университета. 2006. № 2-1. С. 93–97.

6. Сосновская Е.Л., Авдеев А.Н. Прогноз потенциальной удароопасности крутопадающих жильных золоторудных месторождений // Известия высших учебных заведений. Горный журнал. 2016. № 2. С. 74–85.

7. Sosnovskaya E.L., Avdeev A.N. Control over the geotechnical processes at the goldfields of Eastern Siberia // Известия высших учебных заведений. Горный журнал. 2019. № 5. С. 21–29.

8. Amadei B., Stephansson O. Rock stress and its measurement. London: Chapman & Hall, 1997. 490 p.

9. Fairhurst C. Stress estimation in rock: a brief history and review. International Journal of Rock Mechanics and Mining Sciences. 2003. Vol. 40. № 7-8. P. 957–973.

10. Ljunggren C., Chang Y., Janson T., Christiansson R. An overview of rock stress measurement methods. International Journal of Rock Mechanics and Mining Sciences. 2003. Vol. 40. № 7-8. P. 975–989.

11. Сосновский Л.И. Геоинформационная модель напряженного состояния горного массива Дарасунского золоторудного месторождения // Маркшейдерия и недропользование. 2007. № 4. С. 61–64.

12. Сосновский Л.И., Егоров А.Л., Сосновская Э.М. Определение первоначальных напря-

жений массива горных пород одного из рудных месторождений Забайкалья // Проблемы горного производства Восточной Сибири: сб. науч. тр. Чита: Изд-во Читинского института природных ресурсов СО АН СССР, 1991. С. 3–6.

13. Сосновский Л.И., Рашкин А.В., Гараш Ю.Ю. Проявления горного давления на больших глубинах при ведении подземных горных работ на Дарасунском золоторудном месторождении // Вестник Международной академии наук экологии и безопасности жизнедеятельности. 2001. № 10 (34). С. 139–141.

14. Влох В.П. Управление горным давлением на подземных рудниках. М.: Недра, 1994. 208 с.

15. Зубков А.В. Геомеханика и геотехнология. Екатеринбург: Изд-во ИГД УрО РАН, 2001. 335 с.

16. Katsikadelis J.T. Boundary elements: theory and applications. Oxford: Elsevier, 2002. 336 p.

17. Машуков В.И. Численное решение некоторых двумерных задач теории упругости с помощью сингулярных интегральных уравнений // Динамика твердого тела: сб. науч. тр. Вып. 45. Новосибирск: Изд-во Института гидродинамики СО АН СССР, 1980. С. 130–140.

18. Rust W. Non-linear finite element analysis in structural mechanics. Cham, Heidelberg, New York, Dordrecht, London: Springer, 2015. 363 p.

19. Moatamedi M., Khawaja H.A. Finite element analysis. Boca Raton: CRC Press, 2018. 154 p.

20. Сосновская Е.Л. Оценка техногенных напряжений на контуре очистных камер при разработке крутопадающих золоторудных жил малой мощности // Вестник Иркутского государственного технического университета. 2014. № 12. С. 82–88.

## References

1. Brady BHG, Brown ET. *Rock mechanics for underground mining*. Dordrecht: Springer; 2006. 628 p.

2. Jaeger JC, Cook NGW. *Fundamentals of rock mechanics*. London: Chapman & Hall, 1979. 488 p.

3. Neganov VP, Kovalenko VI, Zaitsev BM, Kazachenko YuA, Sosnovskii LI, Tomilov VD, et al. *Technology of developing gold deposits*. Moscow: Nedra; 1995. 336 p. (In Russ.)

4. Petukhov IM, Il'in AN, Trubetskoi KN. Prediction and prevention of rock burst at mines. Moscow: Academy of Mining Sciences; 1997. 377 p. (In Russ.)

5. Sosnovskii LI, Filonyuk VA, Sosnovskaya EL. Mechanism of occurrence and

patterns of spatial distribution of areas with a relatively-high and low natural stress in a mountain range. *Proceedings of Irkutsk State Technical University*. 2006;2-1:93–97. (In Russ.)

6. Sosnovskaya EL, Avdeev AN. The forecast of potential rock bump hazard of steeply pitching lode gold ore deposits. *Izvestiya vysshikh uchebnykh zavedenii. Gornyi zhurnal = Proceedings of higher educational institutions*. Mining journal. 2016;2:74–85. (In Russ.)

7. Sosnovskaya EL, Avdeev AN. Control over the geotechnical processes at the gold-fields of Eastern Siberia. *Izvestiya vysshikh uchebnykh zavedenii. Gornyi zhurnal = Proceedings of higher educational institutions*. Mining journal. 2019;5:21–29.



8. Amadei B, Stephansson O. *Rock stress and its measurement*. London: Chapman & Hall, 1997. 490 p.

9. Fairhurst C. Stress estimation in rock: a brief history and review. *International Journal of Rock Mechanics and Mining Sciences*. 2003;40(7-8):957–973.

10. Ljunggren C, Chang Y, Janson T, Christiansson R. An overview of rock stress measurement methods. *International Journal of Rock Mechanics and Mining Sciences*. 2003;40(7-8):975–989.

11. Sosnovskii LI. Stress-strain geoinformation model of the Darasunsky gold mine rock mass. *Marksheideriya i nedropol'zovanie = Mining Survey and Subsoil Use*. 2007;4:61–64. (In Russ.)

12. Sosnovskii LI, Egorov AL, Sosnovskaya EM. Defining the initial stress of the rock mass of an ore deposit in Trans-Baikal region. *Problemy gornogo proizvodstva Vostochnoi Sibiri: sbornik nauchnykh trudov = Mining practice in Eastern Siberia: collection of scientific works*. Chita: Chita Institute of natural resources, the USSR's Academy of Sciences; 1991. p.3–6. (In Russ.)

13. Sosnovskii LI, Rashkin AV, Garash YuYu. Manifestations of rock pressure at great depths in underground mining at the Darasunsky gold mine. *Vestnik Mezhdunarodnoi akademii nauk ekologii i bezopasnosti zhiznedeyatel'nosti = Bulletin of the*

*International Academy of Ecology and Life Safety*. 2001;10(34):139–141. (In Russ.)

14. Vlokh VP. *Rock pressure control at underground mines*. Moscow: Nedra; 1994. 208 p. (In Russ.)

15. Zubkov AV. *Geomechanics and geotechnology*. Ekaterinburg: Mining Institute, Ural Branch of the Russian Academy of Sciences; 2001. 335 p. (In Russ.)

16. Katsikadelis JT. *Boundary elements: theory and applications*. Oxford: Elsevier; 2002. 336 p.

17. Mashukov VI. Numerical solution of some two-dimensional problems of elasticity theory by means of singular integral equations. In: *Solid body dynamics*. Vol. 45. Novosibirsk: Institute of Hydrodynamics, the Siberian Branch of the Academy of Sciences of the USSR; 1980. p.130–140. (In Russ.)

18. Rust W. Non-linear finite element analysis in structural mechanics. Cham, Heidelberg, New York, Dordrecht, London: Springer; 2015. 363 p.

19. Moatamedi M, Khawaja HA. *Finite element analysis*. Boca Raton: CRC Press; 2018. 154 p.

20. Sosnovskaya EL. Assessment of technogenic stresses in stopes when developing thin steeply dipping gold-ore veins. *Proceedings of Irkutsk State Technical University*. 2014;12:82–88. (In Russ.)

#### Критерии авторства / Authorship criteria

Авдеев А.Н., Сосновская Е.Л., Болотнев А.Ю. написали статью, имеют равные авторские права и несут одинаковую ответственность за плагиат.

Arkady N. Avdeev, Elena L. Sosnovskaya and Alexander Yu. Bolotnev are the authors of the article, hold equal copyright and bear equal responsibility for plagiarism

#### Конфликт интересов / Responsibility for plagiarism

Авторы заявляют об отсутствии конфликта интересов.

The authors declare that there is no conflict of interest regarding the publication of this article.

#### Сведения об авторах / Information about the authors



##### Авдеев Аркадий Николаевич,

кандидат технических наук,  
старший научный сотрудник,  
Институт горного дела УрО РАН,  
620075, г. Екатеринбург, ул. Мамина-Сибиряка, 58, Россия,  
✉ e-mail: avdeev0706@mail.ru

##### Arkady N. Avdeev,

Cand. Sci. (Eng.),  
Senior Researcher,  
Mining Institute, the Ural Branch of the Russian Academy of Sciences,  
58, Mamina-Sibiryaka St., Yekaterinburg, 620075, Russia,  
✉ e-mail: avdeev0706@mail.ru



**Сосновская Елена Леонидовна,**

кандидат геолого-минералогических наук,  
старший научный сотрудник,  
Институт горного дела УрО РАН,  
620075, г. Екатеринбург, ул. Мамина-Сибиряка, 58, Россия,  
e-mail: avdeev0706@mail.ru

**Elena L. Sosnovskaya,**

Cand. Sci. (Geol. and Mineral.),  
Senior Researcher,  
Mining Institute, the Ural Branch of the Russian Academy of Sciences,  
58, Mamina-Sibiryaka st., Yekaterinburg, 620075, Russia,  
e-mail: avdeev0706@mail.ru



**Болотнев Александр Юрьевич,**

кандидат технических наук,  
технический руководитель лаборатории геомеханики и физики  
горных пород кафедры разработки месторождений полезных ископаемых,  
Институт недропользования,  
Иркутский национальный исследовательский технический университет,  
664074, г. Иркутск, ул. Лермонтова, 83, Россия,  
e-mail: abolotnev@mail.ru

**Alexander Yu. Bolotnev,**

Cand. Sci. (Eng.),  
Technical Director, Laboratory of Rock Geomechanics and Physics,  
Department of Mineral Resource Development,  
Institute of Subsoil Use,  
Irkutsk National Research Technical University,  
83, Lermontov St., Irkutsk, 664074, Russia,  
e-mail: abolotnev@mail.ru



Оригинальная статья / Original article  
УДК 622.276.6

## Разработка композиций отверждаемых пен для тампонирувания скважин

© В.Г. Заливин<sup>а</sup>

<sup>а</sup>Иркутский национальный исследовательский технический университет, г. Иркутск, Россия

**Резюме:** Цель работы – исследование параметров тампонажных отверждаемых газожидкостных смесей для использования их при ликвидации геологических осложнений в процессе бурения скважин: для предупреждения и ликвидации поглощений, сохранения устойчивости интервалов слабосвязанных пород, при вскрытии многолетнемерзлых пород. В ходе работы были исследованы смолы на основе суммарных сланцевых фенолов, расширяющиеся смеси на основе фенолформальдегидной смолы ФРВ-1А и отвердителя ВАГ-3; основные свойства пенопластов на основе смолы М-19-62. Изучены такие свойства композиций пенопластов, как вязкость, время отверждения, фильтруемость через пористую среду, прочность и изменение ее во времени, прочность сцепления с поверхностями породы и металла обсадных труб (адгезия), сроки схватывания, изменение объема смеси после полимеризации, вязкости и упругих свойств. В ходе работы были проведены лабораторные исследования, а также отработаны технологии применения пенопластов на производственных скважинах. В результате отображено повышение качества тампонирувания за счет предупреждения преждевременного отверждения газожидкостной смеси при одновременном снижении энергоемкости нагнетания и продавливания. Разработана схема тампонирувания зон осложнений пенопластами. На основании проведенных исследовательских работ определены составы отверждаемых газожидкостных смесей и их технологические параметры для применения в различных геолого-технических условиях бурения скважин. Сделан вывод о том, что применение разработанных отверждаемых газожидкостных смесей способствует обеспечению более высокой производительности процесса бурения и уменьшению стоимости строительства скважин.

**Ключевые слова:** отверждаемые газожидкостные смеси, составы, параметры, смолы, тампонирувание

**Информация о статье:** Дата поступления 30 июля 2019 г.; дата принятия к печати 19 августа 2019 г.; дата онлайн-размещения 30 сентября 2019 г.

**Для цитирования:** Заливин В.Г. Разработка композиций отверждаемых пен для тампонирувания скважин. *Науки о Земле и недропользование*. 2019. Т. 42. № 3. С. 336–348.

## Developing hardenable foam compositions for well tamping

© Vladimir G. Zalivin<sup>a</sup>

<sup>a</sup>Irkutsk National Research Technical University, Irkutsk, Russia

**Abstract:** The aim of the work is to study the parameters of hardenable gas-liquid mixtures that can eliminate geological complications in well drilling, i.e. prevent and eliminate absorption, maintain the interval stability of loose rocks, and ensure trouble-free permafrost drilling-in. The study has been conducted for resins based on aggregate shale phenols, expanding mixtures based on phenol-formaldehyde FRV-1A resin and VAG-3 curing agent, and foams based on M-19-62 resin. The following properties of the foam compositions have been studied: viscosity, curing time, filterability, strength and its change over time, adhesion with the rock and metal casing surfaces, setting time, change in the mixture volume after polymerization, viscosity and elastic properties. The research methods include laboratory experiments and field tests at running wells. The study has shown an increase in the tamping quality, i.e. prevention of the gas-liquid mixture early curing and the power intensity reduction when injecting and forcing. A scheme of troublesome zones tamping with foam plastics has been developed. Based on the results of the study, the compositions of hardenable gas-liquid mixtures and their technological parameters have been developed for different geological-and-technical well-drilling conditions. The conclusion is that the developed hardenable gas-liquid compounds ensure higher performance of the drilling process and lower costs of the well construction.

**Keywords:** solidifying gas-liquid mixture, compositions, parameters, resins, tamping

**Information about the article:** Received July 30, 2019; accepted for publication August 19, 2019; available online September 30, 2019.



**For citation:** Zalivin V.G. Developing hardenable foam compositions for well tamping. *Earth Sciences and Subsoil Use*. 2019;42(3):336–348. (In Russ.)

### Введение

Развитие отечественной геолого-разведочной отрасли делает весьма актуальным разработку научных подходов к составам буровых растворов, позволяющих осуществлять цикл бурения с высокой механической скоростью и одновременным тампониowaniem зон поглощений в зонах пониженного пластового давления. С этих позиций применение газожидкостных смесей в качестве очистного агента и тампонажного материала наиболее актуально.

Для получения тампонажных материалов автором данной статьи исследованы карбамидная смола, смолы ФРВ-1А и ТСД-9.

Смола ТСД-9 является композицией водорастворимых суммарных сланцевых фенолов, стабилизированной спиртом и пластифицированной диэтиленгликолем [1]. Данная смола является вязкой жидкостью темно-коричневого цвета, хорошо растворимой в спирте, в растворах щелочей и до соотношения 1:3 – в воде. При дальнейшем разбавлении происходит расслоение смеси с выделением воды. Наличие минеральных солей в воде, применяемой для разбавления смолы, резко снижает растворимость последней. В нефтепродуктах смола не растворяется. Присутствие же их в рабочих растворах на сроки отверждения и качество отвержденной смолы влияния не оказывает. Она отверждается как в щелочной, так и в нейтральной среде. Для приготовления рабочих растворов смолы используются пресная вода и формалин или параформ.

### Материалы и методы исследования

Тампонажные материалы на основе исследованных смол пригодны для изоляции зон поглощений с различными типами отвердителей, наполнителей и катализаторов отверждения.

На основе смолы ТСД-9 могут быть приготовлены как водные растворы тампонажных смесей, так и суспензии глины,

цемента, кварцевого песка, древесной муки и опилок. Основные показатели водных растворов смолы ТСД-9 (вязкость, время отверждения, фильтруемость через пористую среду) и отвержденного полимера (прочность и изменение ее во времени, прочность сцепления с поверхностями породы и металла обсадных труб, изменение в объеме) определяются степенью разбавления смолы водой, применяемыми отвердителем и катализатором и их концентраций, а также температурой среды.

Время начала отверждения тампонажных смесей является одним из основных показателей при применении их в качестве изоляционного материала. Этот показатель зависит от степени разбавления смолы, содержания отвердителя и температуры. Однако с увеличением содержания в растворах смолы формалина время их отверждения может быть сокращено лишь до какого-то предела, определенного для данной температуры. Это содержание формалина в растворе смолы соответствует эквимолекулярному соотношению фенолов (средний молекулярный вес – 150) и формалина. Дальнейшее сокращение времени отверждения растворов смолы может быть достигнуто путем введения в них катализатора (NaOH). Лишь с применением катализатора могут быть приготовлены растворы смолы с приемлемыми сроками отверждения (2–3 ч) для условий низких температур – ниже 20 °С.

При приготовлении раствора смолы ТСД-9, требующем использования катализатора, необходимо учитывать, что сам процесс растворения твердого едкого натра является экзотермическим. Кроме того, реакция конденсации смол, синтезированных на основе водорастворимых сланцевых фенолов, также является экзотермической, что необходимо учитывать при построении технологических схем изоляционных работ с их применением [2].



При изучении возможности применения смолы ТСД-9 в качестве тампонажного материала прежде всего изучалась возможность получения смолоцементов [3], а затем и суспензий с использованием в качестве твердой фазы глинопорошка, кварцевого песка, латекса. Для регулирования сроков схватывания автор работы рекомендует использовать раствор кальцинированной соды.

Смола ТС-10 [4] синтезирована специально для применения в качестве изоляционного материала в скважинах с пластовой температурой 50–70 °С. Смола ТС-10 и тампонажные смеси на ее основе отверждаются в щелочной и нейтральной средах. В качестве отвердителя тампонажных смесей на основе смолы ТС-10 используются уротропин, формалин и их смеси.

Свойства суспензии глины на основе смолы ТС-10 аналогичны свойствам суспензии на основе смолы ТСД-9 и определяются свойствами смолы ТС-10, применяемым отвердителем и его концентрацией, степенью разбавления и температурой окружающей среды [5, 6].

#### **Расширяющиеся смеси на основе фенолформальдегидной смолы ФРВ-1А и отвердителя ВАГ-3**

С целью совершенствования рецептур тампонирующих смесей в Иркутском отделении Всероссийского института техники разведки были проанализированы расширяющиеся смеси на основе фенолформальдегидной смолы ФРВ-1А и отвердителя ВАГ-3 [7], изучены возможности использования пенопластов при различных температурных режимах скважины, а также проведены исследования зависимости времени отверждения смолы от температуры окружающей среды.

При содержании 20 г смолы ФРВ-1А и 4 г отвердителя ВАГ-3 проводили отверждения пенопластов при различных температурах. До 12 °С отверждение смолы протекало в течение 5 ч, причем масса в объеме не увеличивалась. Увеличение объема пенопласта фенолформальдегидной смолы, содержащей

порошок алюминия, происходит за счет выделения водорода, который образуется при взаимодействии алюминия с водой. В чистом виде алюминий вследствие образования на его поверхности защитной оксидной пленки не вытесняет водород из воды [8]. Однако при удалении ее он энергично взаимодействует с водой с выделением водорода. Разбавленные кислоты легко растворяют эту пленку, особенно при нагревании. Поэтому в нашем опыте при температурах до 12 °С не происходило увеличение объема, а энергия, необходимая реакции, была настолько маленькой, что реакция полимеризации протекала 5 ч.

По графику (рис. 1) видно, что с увеличением температуры, начиная с 12 °С, увеличивается скорость реакции полимеризации, происходит увеличение объема. Чем выше температура, тем меньше время отверждения и выше кратность, так как быстрее происходит разрушение защитной оксидной пленки алюминия, который вытесняет водород из воды. Вода образуется в результате реакции поликонденсации смолы. Выделившийся водород начинает расширять и увеличивать объем полимера.

Вышеописанные результаты подтверждают исследования зависимости сроков отверждения и кратности пенопласта от температуры окружающей среды (см. рис. 1).

Смолу и отвердитель при температуре до 15 °С отверждали в интервале температур 20–50 °С. С увеличением температуры происходит увеличение сроков вспенивания и уменьшение сроков отверждения смолы ФРВ-1А [9].

Для определения подвижности компонентов при различных температурах были проведены измерения динамической вязкости ФРВ-1А и отвердителя ВАГ-3 (рис. 2).

С целью выявления изменений плотности, кратности и прочности в зависимости от давления приготовления пенопласта были проведены исследования в специально изготовленном цилиндре.

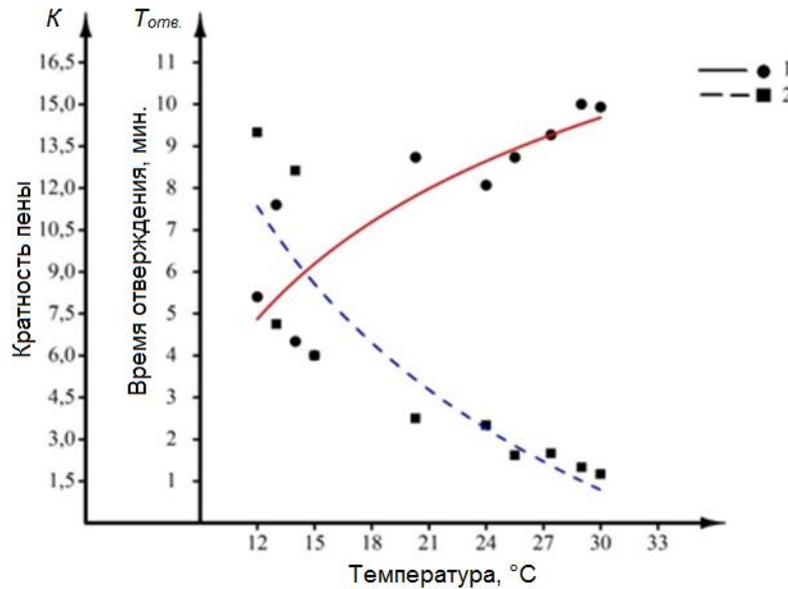


Рис. 1. Зависимость кратности (1) и времени отверждения (2) пенопласта от температуры окружающей среды

Fig. 1. Dependence of the polyfoam's multiplicity (1) and curing time (2) on the ambient temperature

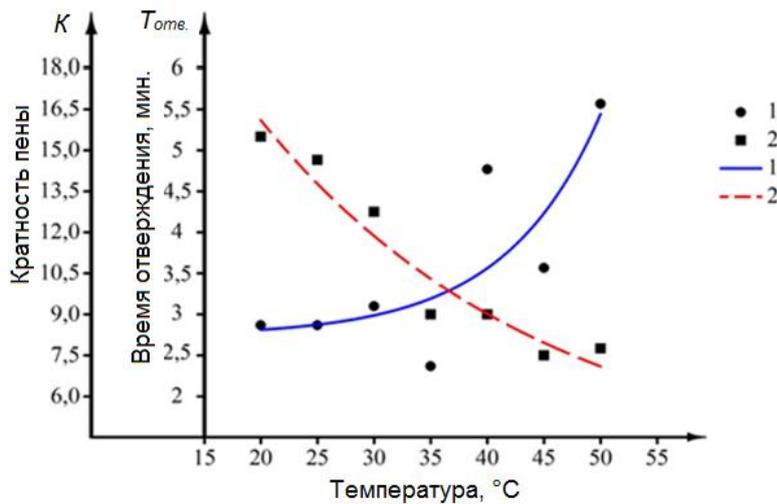


Рис. 2. Зависимость кратности (1) и времени отверждения (2) пенопласта от температуры окружающей среды при изменении динамической вязкости

Fig. 2. Dependence of the polyfoam's multiplicity (1) and curing time (2) on the ambient temperature, with the changing dynamic viscosity

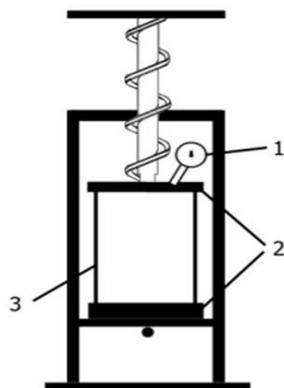
Пенопласт получался в приборе, изображенном на рис. 3.

Высота цилиндра составляла 126,4 мм; внутренний диаметр цилиндра – 76,3 мм; объем цилиндра – 578 см<sup>3</sup>.

Чтобы реакционная смесь не попала в манометр, над ней устанавливалась резиновая прокладка. Объем прокладки был равен 15 см<sup>3</sup>; рабочий объем цилиндра – 563 см<sup>3</sup>.

При свободном вспенивании верхняя крышка снималась с цилиндра. В остальных случаях крышка плотно прижималась к цилиндру.

Использовалась реакционная смесь, состоящая из 80 масс. % ФРВ-1А и 20 масс. % ВАГ-3. Температура окружающей среды – 16–18 °С.



**Рис. 3. Прибор для получения пенопласта:**

1 – манометр; 2 – верхняя и нижняя крышки; 3 – полый металлический цилиндр

**Fig. 3. Device for obtaining the polyfoam:**

1 – gauge; 2 – upper and lower covers; 3 – hollow metal cylinder

Результаты изображены на рис. 4. При свободном вспенивании объем пенопласта значительно превышает объем формы (60 г ФРВ-1А и 15 г ВАГ-3).

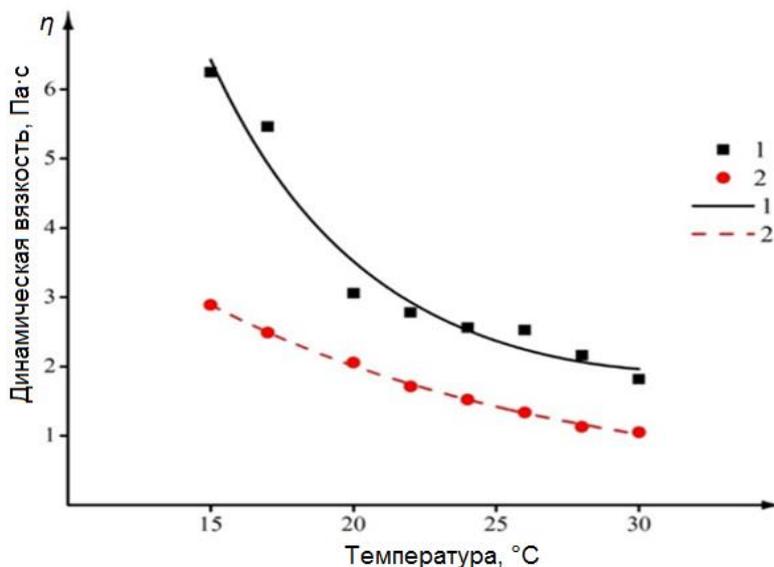
Образец к стенкам цилиндра не прилегает, форма его неровная.

Кажущаяся плотность –  $70 \text{ кг/м}^3$ . При получении пенопласта в замкнутом объеме давление создается самой композицией.

Во всех случаях пенопласт занимает почти полный объем цилиндра, оставляя незначительное место для сжатых газов и паров.

Образец пенопласта № 2 из цилиндра вынимается с усилием. Наружная поверхность его липкая, так как скорость реакции замедляется при контакте с металлической поверхностью цилиндра в результате отвода тепла в окружающее пространство. Постепенно поверхность пенопласта отверждается на воздухе.

Образец пенопласта № 3 состоит из двух слоев (как бы «в рубашке»). Розовое основное твердое тело покрыто серым липким слоем. Образец вручную не выдавливается из формы. Для того чтобы образец выдавить из формы, потребовалась нагрузка 180 кгс.



**Рис. 4. Зависимость динамической вязкости смолы ФРВ -1А (1) и отвердителя ВАГ-3 (2) от температуры окружающей среды**

**Fig. 4. Dependence of the dynamic viscosity of FRV-1A resin (1) and VAG-3 curing agent (2) on the ambient temperature**



При выдавливании образца № 4 из формы потребовалось применить нагрузку в 810 кгс. Образец покрыт прочной поверхностной коркой (не вспененной) толщиной 2,5–3 мм, липкого слоя нет.

В результате сильного разогрева отверждение проходит во всем объеме вспененной массы.

Нагрузка при выдавливании образца № 5 составляет 970 кгс.

Кажущаяся плотность верхних слоев всех образцов всегда меньше, чем нижних (рис. 5).

Вспененные смолы, как и все пены, являются структурированными системами. Вязкость их максимальная в состоянии покоя, но при движении пен, чем выше градиент скорости, тем больше степень разрушения структуры и меньше вязкость.

В процессе вспенивания компонентов тампонажной смеси, движения ее по бурильным трубам и в зонах поглощения смесь подвергается деформации. Поэтому нами проведены лабораторные исследования по изучению прочностных свойств пенопласта в зависимости от

времени его деформации в процессе твердения.

Опыт осуществлялся по следующей методике. Исходные компоненты смеси вспенивали до получения постоянного объема пены и добавляли концентрированную ортофосфорную кислоту ( $H_3PO_4$ ). В условиях опыта состав смеси (смола М-19-62 – 66,7 вес. %, однопроцентный раствор вспенивателя Е-30 – 33,3 вес. % и кислота – 0,4 об. %) соответствовал составу, приведенному на рис. 1. Отверждаемую смесь перемешивали мешалкой в течение 35 мин. За это время через 8, 11, 14, 18, 25, 35 мин отбирались пробы и ими заполнялись цилиндрические емкости [10].

Затем образцы подвергались исследованию на сжатие в два раза. Прочность пенопласта в условиях опыта с увеличением времени перемешивания с 8 до 14 мин растет, а затем резко падает. При деформировании испытуемой смеси в течение 25 и 35 мин свойства пенопласта не восстановились в течение времени. В данном случае получена лишь отвержденная крошка.

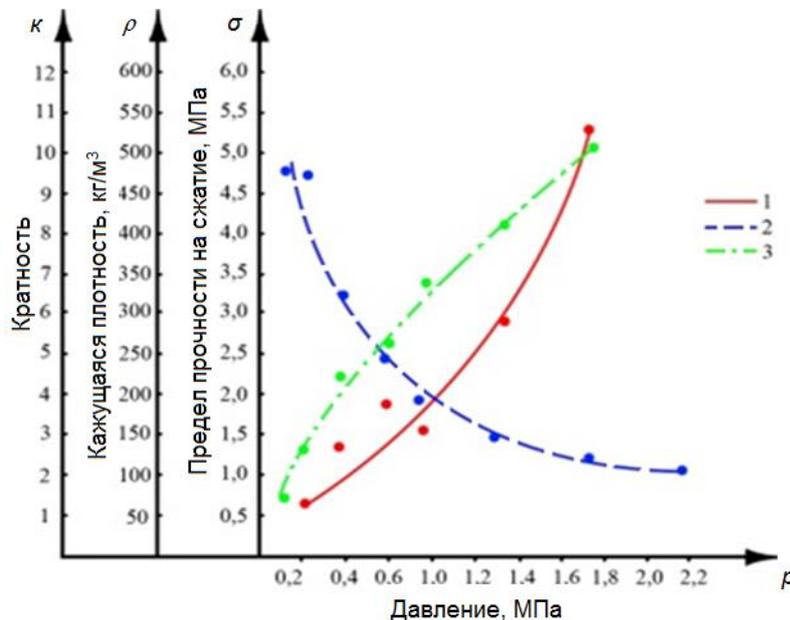


Рис. 5. Экспериментальные зависимости предела прочности на сжатие (1), кратности (2) и кажущейся плотности (3) пенопласта от избыточного давления

Fig. 5. Experimental dependence of the polyfoam's compressive strength (1), multiplicity (2) and apparent density (3) on overpressure



Таким образом, время движения смеси окажет значительное влияние на качество тампонирования.

Исходя из проведенных исследований, сделаны выводы, что смеси на основе ФРВ-1А, отверждаемые ВАГ-3, можно использовать для изоляции зон поглощений в качестве тампонирующих смесей при температуре горных пород выше 13 °С.

#### **Исследование основных свойств пенопластов на основе смолы М-19-62**

Исследование основных свойств пенопластов – вязкости, прочности и остаточной деформации – проводились в лабораторных условиях с использованием стандартных приборов и оборудования. В качестве исходных реагентов использовались карбамидная смола М-19-62, эмульгатор Е-30 и ортофосфорная кислота.

Для изучения характера отверждения пенопласта проводились исследования изменения вязкости вспененных и обычных растворов смесей при различных концентрациях отвердителя. Исследования проводились с использованием ротационного вискозиметра Реостат-2 (Германия).

Исследуемая смесь на 66,7 % состояла из смолы и на 33,3 % – из однопроцентного раствора эмульгатора Е-30. Кратность вспененной массы смеси составляла 2,6–3.

Методика проведения исследований заключалась в следующем. Смесь объемом 200 мл помещалась в химический стакан объемом 800 мл и вспенивалась с помощью механической мешалки до получения постоянного объема пены. Ортофосфорную кислоту добавляли в пену при работающей мешалке. Затем определенный объем смеси или пены, содержащей отвердитель, помещался в измерительный цилиндр вискозиметра и включалось вращение с постоянным градиентом скорости. Показания прибора записывались в журнал наблюдений. Отсчет времени велся по секундомеру с момента добавления отвердителя.

Для всех приведенных зависимостей характерен начальный участок, где изменение вязкости во времени незначительно. При достижении определенного критического уровня времени вязкость начинает быстро возрастать, что соответствует началу интенсивного отверждения исследуемых смол [11]. Данный факт следует учитывать при проведении работ по тампонированию зон поглощений промывочной жидкостью, то есть заканчивать продавку тампонажной смеси в момент интенсивного отверждения. Замечено также, что начало интенсивного отверждения смеси в условиях опыта у вспененных и обычных смесей при одинаковой концентрации отвердителя практически идентично. Следовательно, при подборе времени схватывания отверждающихся газожидкостных смесей (ОГЖС), которое зависит не только от количества отвердителя, но и от качества используемой смолы, достаточно определить время схватывания исходного раствора смолы, что легче в исполнении.

Пенопласты обладают упругостью, которая определяет поведение отверждающихся смесей в трещинах поглощающих горизонтов [12]. Автором данной статьи проводились исследования по изучению упругих свойств пенопластов в зависимости от времени отверждения. С этой целью использовался прибор «Вика», в котором игла была заменена индентором диаметром 18 мм.

Методикой работ предусматривалось заполнение цилиндров диаметром 19 мм и высотой 20 мм вспененной смолой с отвердителем одного состава. Затем по мере отверждения смеси заполненные цилиндры поочередно ставились под индектор и подвижная часть прибора нагружалась грузом (гирями) до сжатия образца на 10 мм (в два раза). После снятия нагрузки со шкалы прибора снимался восстановленный линейкой размер образца. Отсчет времени, как и в предыдущем опыте, производился с момента добавления в пенопласт отвердителя.



Изменение прилагаемой нагрузки на сжатие в два раза опытных образцов пенопласта по мере их отверждения имеет практически линейный характер. А восстановление в объеме образца имеет выраженный максимум, где восстановление образца равно более 95 %. Затем по мере увеличения прочности пенопласта остаточная деформация увеличивается.

Это свойство пенопласта должно играть положительную роль при тампонирувании под давлением, то есть с применением пакеров. После снятия давления отверждающийся пенопласт должен расклиниваться в зонах поглощений промысловочной жидкости и переходить в состояние напряженного пенопласта. Поэтому даже при наличии частичной усадки пенопласта зоны поглощений должны надежно закупориваться [13].

Изучено повышение качества тампонирувания за счет предупреждения преждевременного отверждения газожидкостной смеси при одновременном снижении энергоемкости нагнетания и продавливания. В скважину нагнетают ОГЖС и продавливают смесь до начала интенсивного отверждения и деформационного разупрочнения. При продавливании газожидкостной смеси в интервал тампонирувания происходит увеличение температуры воздушной фазы за счет сжатия пузырьков газа под избыточным давлением. Так как теплопроводность ОГЖС очень мала при незначительном времени теплообмена, потери тепла на теплообмен с окружающей средой практически равны нулю – и процесс рассматривается как адиабатический. Прирост температуры газожидкостной смеси при этом определяется по формуле:

$$\Delta t_c = \frac{C_{\beta} \cdot \rho_{\beta}^0 \cdot K_a \cdot T_1}{C_{\text{ж.ф}} \cdot \rho_{\text{ж.ф}}} \cdot \left[ \frac{P_2}{P_1} - \left( \frac{P_2}{P_1} \right)^{1/K} \right],$$

где  $C_{\beta}$  – теплоемкость воздуха при давлении продавливания, Дж/кг·°С;  $\rho_{\beta}^0$  – плотность воздушной фазы в нормальных условиях, (кг/м<sup>3</sup>);  $K_a$  – газожидкостное соотношение;  $T_1$  – начальная температура воздуха в тампонирующей смеси,

Дж/кг·°С;  $C_{\text{ж.ф}}$  – теплоемкость жидкой фазы тампонажной смеси, Дж/кг·°С;  $\rho_{\text{ж.ф}}$  – плотность жидкой фазы тампонирующей смеси, кг/м<sup>3</sup>;  $P_1$  – атмосферное давление;  $P_2$  – конечное давление продавливания смеси;  $K$  – показатель адиабаты сжатия воздуха.

Конечная температура тампонирующей смеси с учетом ее прироста от сжатия воздушной фазы

$$t_{\text{т.с}} = T_1 + \Delta t_{\text{т.с}},$$

здесь  $\Delta t_{\text{т.с}}$  – прирост температуры, °С.

В связи с этим нагнетание газа и отвердителя осуществляют с учетом прироста температуры от адиабатического сжатия воздушной фазы при давлении нагнетания и продавливания.

В таблице приведены результаты расчета прироста температуры  $t_{\text{т.с}}$  по формуле в зависимости от давления продавливания и газожидкостного соотношения тампонирующей смеси  $K_a$ .

На графиках (рис. 6) приведены экспериментальные данные, характеризующие зависимость времени начала интенсивного отверждения газожидкостной тампонирующей смеси от температуры при различном содержании отвердителя.

### Результаты

Приведенные данные соответствуют отверждаемой смеси, имеющей следующее соотношение компонентов, мас. %:

карбамидо-формальдегидная смола КФ-МТ (по ГОСТ 14231-78) – 71;

пенообразователь (сульфанол) – 0,37;

отвердитель (щавелевая кислота) – 0,1–1;

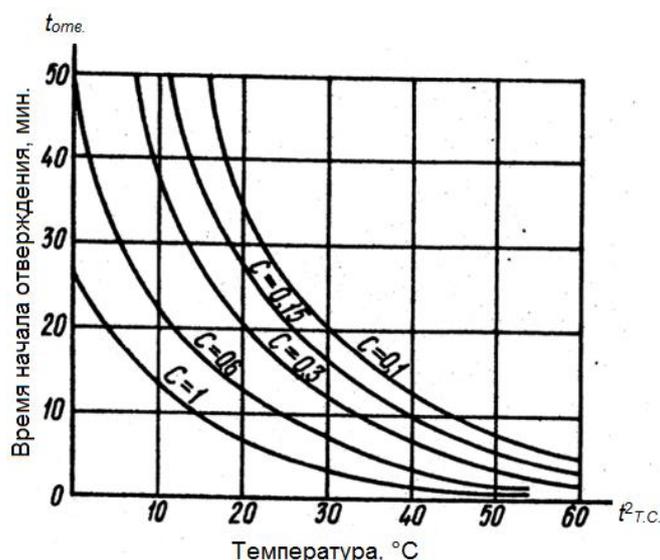
вода – остальное.

Способ осуществляют следующим образом. Необходимо затампонировать интервал закарстованных пород на глубине 885–890 м. На основании опытных данных для этого интервала объем ОГЖС составляет 3 м<sup>3</sup>, а максимальное давление продавливания тампонирующей смеси  $P = 3$  МПа. Начальная температура тампонирующей смеси на устье



**Зависимость давления продавливания  
от прироста температуры тампонирующей смеси  
Dependence of the forcing pressure  
on the tamping mixture temperature increase**

Давление продавливания $P_2$ , кг/см <sup>2</sup>	Прирост температуры $\Delta t_{т.с.}$ тампонирующей смеси, °С, при газожидкостном соотношении $K_a$			
	20	50	70	100
5	0,33	0,84	1,16	1,67
10	0,88	2,19	3,07	4,4
20	2,09	5,22	7,31	10,44
30	3,39	8,46	11,85	16,92
40	4,73	11,83	16,56	23,66
50	6,11	15,28	21,39	30,56
60	7,51	18,78	26,29	37,56
100	13,27	33,18	46,45	66,36



**Рис. 6. Зависимость времени начала отверждения от температуры отвердителя**  
 $C$  – концентрация отвердителя, масс. %

**Fig. 6. Dependence of curing start time on the curing agent temperature**  
 $C$  – curing agent concentration, mass. %

скважины  $T_1 = 25$  °С. Оптимальное газожидкостное соотношение ОГЖС для данных условий  $K_a = 20-70$ , а допустимое время нагнетания и продавливания до начала интенсивного отверждения смеси  $t_n$  – 18 мин. По данным рис. 6 определяем, что для  $P_1 = 3$  МПа,  $K_a = 20-70$  и  $T_1 = 25$  °С прирост температуры тампонирующей смеси указанной рецептуры ( $dt_{т.с.}$ ) составит 3,39–11,8 °С соответственно, а ее конечная температура будет находиться в пределах 28–37 °С соответственно. Далее исходя из необходимого объема закачиваемой ОГЖС (3 м<sup>3</sup>) и

продавочной жидкости, а также технической характеристики нагнетательного оборудования находим необходимое время нагнетания и продавливания смеси.

Используемый дожимной насос НБ4-320/63 при диаметре плунжера 80 мм обеспечивает подачу 125, 180 и 15320 дм<sup>3</sup>/мин. Для нагнетания 3 м<sup>3</sup> ОГЖС на третьей ступени подачи необходимое время составит 9,4 мин, а для нагнетания продавочной жидкости (0,885 м<sup>3</sup> при внутреннем объеме 1 м бурильных труб, равном 1 дм<sup>3</sup>) на первой ступени подачи – 7,1 мин. Общее время нагнетания



и продавливания ОГЖ для данных условий составляет не менее 16,5 мин. Таким образом, необходимо выбрать такое сочетание  $K_a$  и содержание отвердителя в тампонирующей смеси, чтобы время начала ее интенсивного отверждения и деформационного разупрочнения, определяемое по кривым кинетики отверждения для температурного интервала 28–37 °С, то есть с учетом повышения температуры от сжатия газовой фазы, было равным или несколько превышало общее время нагнетания и продавливания ОГЖС (16,5 мин).

По данным рис. 6 и 7, этому условию отвечает  $K_a = 20$  и концентрация отвердителя (щавелевой кислоты) в ОГЖС 0,15 мас. %, а также  $K_a = 50$  и концентрация отвердителя 0,1 мас. %.

С учетом обеспечения минимального расхода компонентов ОГЖС, который уменьшается с увеличением  $K_a$ , принимаем  $K_a = 50$  и концентрацию отвердителя 0,1 мас. %. Тогда необходимый объемный расход воздуха при расходе жидкой фазы ОГЖС  $V_{ж.ф.} = 10$  дм<sup>3</sup>/мин составит  $V_e = K_a (V = 50 \cdot 10 \text{ дм}^3/\text{мин} = 500 \text{ дм}^3/\text{мин})$ .

Тампонирующее по предлагаемому способу после расчета необходимых данных осуществляют следующим образом. В емкости 1 (рис. 8) приготавливается раствор смолы (КФ-МТ) и пенообразователя (сульфонол), в емкости 2 – раствор кислого отвердителя, и в емкости

3 – продавочная жидкость. Кран 4 открыт, а кран 5 закрыт. Производится включение подпорного насоса 6, дожимного насоса 7, компрессора 8 и кислотного насоса 9. Подача подпорного насоса 6 и кислотного насоса 9 отрегулирована из расчета обеспечения суммарной подачи жидкой фазы ОГЖС ( $V_{ж.ф.}$ ), включая раствор смолы, пенообразователя и кислотного отвердителя 10 дм<sup>3</sup>/мин при соотношении подачи (концентрации) отвердителя 0,1 мас. % от  $V_{ж.ф.}$  Расход воздуха от компрессора расходомером 12 установлен на 500 дм<sup>3</sup>/мин, что обеспечивает требуемое газожидкостное соотношение закачиваемой ОГЖС ( $K_a = 50$ ). ОГЖС через колонну бурильных труб 10, на конце которой смонтирован пакер 11, поступает в тампонируемый интервал. После закачивания требуемого объема ОГЖС (3 м<sup>3</sup>) в течение расчетного времени 9,4 мин включают компрессор 8, кислотный насос 9 и подпорный насос 6. Закрывают кран 4, открывают кран 5 и дожимным насосом 7, включенным на подачу 125 дм<sup>3</sup>/мин, осуществляют в течение 7,1 мин продавливание ОГЖС из бурильной колонны в зону тампонирувания. Затем выдерживают тампонирующую смесь под давлением в течение 1–4 ч до окончательного формирования пространственной структуры пенопласта, после чего производят разгерметизацию затрубного пространства путем открытия пакера и дальнейшие работы на скважине.

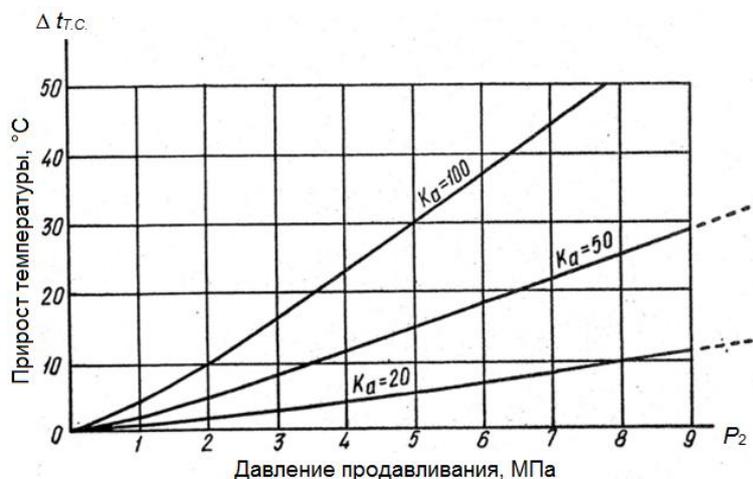
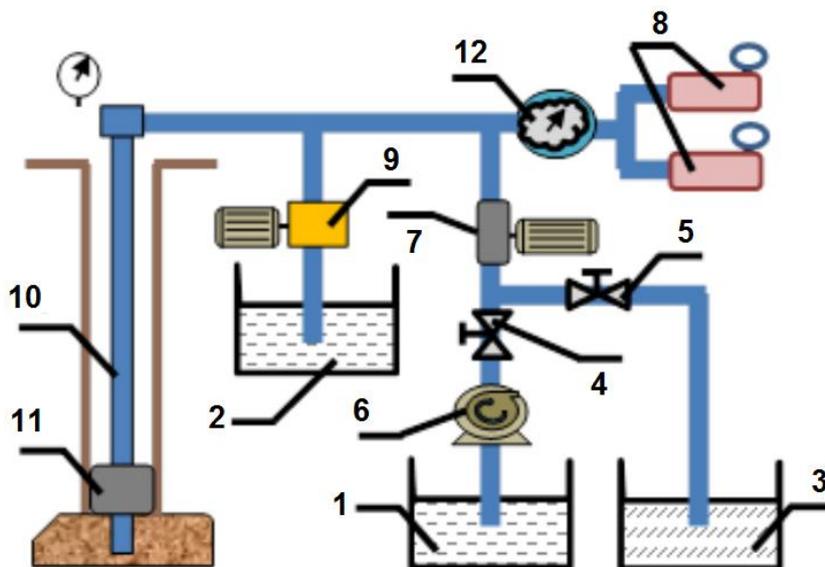


Рис. 7. Зависимость давления продавливания от прироста температуры  
Fig. 7. Dependence of the forcing pressure on the temperature increase



**Рис. 8. Схема тампонирования отверждаемых газожидкостных смесей:**

1 – емкость со смолой; 2 – емкость с раствором кислого отвердителя; 3 – емкость с продавочной жидкостью; 4, 5 – краны; 6 – подпорный насос; 7 – дожимной насос; 8 – компрессор; 9 – кислотный насос; 10 – бурильные трубы; 11 – тампонируемый пакер; 12 – расходомер воздуха

**Fig. 8. Diagram of plugging hardenable gas-liquid mixtures:**

1 – tank with the resin; 2 – reservoir with the acidic curing agent solution; 3 – reservoir with the forcing liquid; 4, 5 – cranes; 6 – supporting pump; 7 – booster pump; 8 – compressor; 9 – acid pump; 10 – collars; 11 – tamping packer; 12 – airflow meter

### Заключение

Применение ОГЖС обеспечивает высокие технико-экономические показатели процесса бурения, снижает его

себестоимость и при уменьшении затрат времени на ликвидацию геологических осложнений способствует сокращению сроков сооружения скважин.

### Библиографический список

1. А. с. 737424 СССР. Полимерная композиция / Ю.Е. Ермилова. 1980. Бюл. № 20.
2. Николаев Н.И., Иванов А.И. Результаты аналитических и экспериментальных исследований закупоривающей способности полимерглинистых тампонажных составов при бурении нефтяных и газовых скважин // Строительство нефтяных и газовых скважин на суше и на море. № 5. М.: Изд-во ВНИИОЭНГ, 2009. С. 8–11.
3. Юсупов И.Г. Исследование структурообразования цементных и полимерцементных композиций на основе смол ТСД-9 в пластовых водах хлоркальциевого типа // Нефтепромысловое хозяйство месторождений Татарии. № 486. М.: Изд-во ВНИИОЭНГ, 1978. С. 22–35.
4. Вязальщиков В.М. Экспериментально-лабораторные исследования состава на основе смолы ТС-10, предназначенного для изоляционных работ // Известия высших учебных заведений. Нефть и газ. 1979. № 7. С. 15–27.
5. Гусейнов Ф.А., Расулов А.М. Повышение эффективности капитального ремонта газовых скважин в условиях Крайнего Севера // Разработка и эксплуатация газовых и газоконденсатных месторождений. Вып. 5. М.: Изд-во ВНИИЭГазпром, 1989. С. 38–46.
6. Ашрафьян М.О., Гринько Ю.В., Куксов А.К., Нижник А.Е., Жадан Ю.Г. Цементирование скважин тампонажными растворами с высокими изолирующими свойствами // Нефтяное хозяйство. 2002. № 3. С. 29–31.
7. Заливин В.Г. Эффективные технологии применения пены при бурении и креплении скважин: монография. Иркутск: Изд-во ИРНТУ, 2017. 212 с.
8. Белов В.И. К изучению механизма тепловых процессов, происходящих в водном растворе смолы ТС-10 при приготовлении и нагнетании его в скважину // Бурение. 1978. № 1. С. 59–67.
9. Роджерс В.Ф. Состав и свойства промышленных жидкостей для бурения нефтяных скважин. М.: Недра, 1967. 595 с.
10. Ritz J.B., McDaniel B.R. New preflush technique aids primary remedial cements jobs // World Oil. 1968. Vol. 168. № 2. P. 117–126.



11. McLean R.H., Manry C.W., Whitaker W.W. Displacement mechanics in primary cementing // *Journal of Petroleum Exploration and Production Technology*. 1967. Vol. 19. № 2. P. 91–96.

12. Грей Дж.Р., Дарли Г.С.Г. Состав и свойства буровых агентов (промывочных жидкостей) / пер. с англ. М.: Недра, 1985. 509 с.

13. Заливин В.Г., Смолин Е.А. Применение отверждаемых газожидкостных смесей при ликвидации поглощений // *Геология, поиски и разведка полезных ископаемых и методы геологических исследований: материалы Всерос. науч.-техн. конф. с междунар. уч. «Геонауки-2013»*. Вып. 13. Иркутск: Изд-во ИрГТУ, 2013. С. 349–354.

## References

1. Ermilova YuE. *Polymer composition*. Author's certificate 737424 USSR; 1980. (In Russ.)

2. Nikolaev NI, Ivanov AI. Analytical and experimental studies of the plugging properties of polymer-clay grouting compositions in oil and gas well drilling. In: *Overland and asea construction of oil and gas wells on land and at sea*. No. 5. Moscow: All-Russian Research Institute of Organization, Management and Economy of Oil and Gas Industry; 2009. p.8–11. (In Russ.)

3. Yusupov IG. Structure formation of cement and polymer-cement compositions based on TSD-9 resins in the calcium-chloride produced water. In: *Oil-field economy of the Tatarstan fields*. No. 486. Moscow: All-Russian Research Institute of Organization, Management and Economy of Oil and Gas Industry; 1978. p.22–35. (In Russ.)

4. Vyazal'shchikov VM. Experimental and laboratory studies of the TS-10 resin-base composition for insulation purposes. *Oil and Gas Studies*. 1979;7:15–27. (In Russ.)

5. Guseinov FA, Rasulov AM. Improving the efficiency of gas wells overhaul in the Far North of Russia. In: *Development and operation of gas and gas condensate fields*. Iss. 5. Moscow: All-Russian Research Institute of Economy, Industrial Engineering and Performance in Gas Industry; 1989. p.38–46. (In Russ.)

6. Ashraf'yan MO, Grin'ko YuV, Kuksov AK, Nizhnik AE, Zhadan YuG. High-insulation cement slurries. *Oil Industry*. 2002;3:29–31. (In Russ.)

7. Zalivin VG. *Effective technologies for foam application in well drilling and cementing*. Irkutsk: Irkutsk National Research Technical University; 2017. 212 p. (In Russ.)

8. Belov VI. On the mechanism of thermal processes taking place in an aqueous solution of TS-10 resin while preparing and injecting it into the well. *Burienie = Drilling*. 1978;1:59–67. (In Russ.)

9. Rogers VF. *Composition and properties of washing fluids used in oil well drilling*. Moscow: Nedra; 1967. 595 p. (In Russ.)

10. Ritz JB, McDaniel BR. New preflush technique aids primary remedial cements jobs. *World Oil*. 1968;168(2):117–126.

11. McLean RH, Manry CW, Whitaker WW. Displacement mechanics in primary cementing. *Journal of Petroleum Exploration and Production Technology*. 1967;19(2):91–96.

12. Darley H, Gray G. *Composition and properties of drilling and completion fluids*. Moscow: Nedra; 1985. 509 p. (In Russ.)

13. Zalivin VG, Smolin EA. The use of hardenable gas-liquid mixtures for absorption elimination. In: *Geologiya, poiski i razvedka poleznykh iskopaemykh i metody geologicheskikh issledovaniy: materialy Vserossiiskoi nauchno-tekhnicheskoi konferentsiei s mezhdunarodnym uchastiem "Geonauki-2013" = Geology, prospecting and exploration of minerals, and geological research methods: All-Russian scientific and technical conference with international participation "Geosciences-2013"*. Iss. 13. Irkutsk: Irkutsk State Technical University; 2013. p.349–354. (In Russ.)

## Критерии авторства / Authorship criteria

Заливин В.Г. написал статью, имеет на нее авторские права и несет ответственность за плагиат.

Vladimir G. Zalivin is the author of the article, holds the copyright and bears responsibility for plagiarism.

## Конфликт интересов / Responsibility for plagiarism

Автор заявляет об отсутствии конфликта интересов.

The author declares that there is no conflict of interest regarding the publication of this article.



## Сведения об авторе / Information about the author

**Заливин Владимир Григорьевич,**

кандидат технических наук,  
доцент кафедры нефтегазового дела,  
Институт недропользования,  
Иркутский национальный исследовательский технический университет,  
664074, г. Иркутск, ул. Лермонтова, 83, Россия,

✉ e-mail: zalivinvg@yandex.ru

**Vladimir G. Zalivin,**

Cand. Sci. (Eng.),  
Associate Professor, Oil and Gas Department,  
Institute of Subsoil Use,  
Irkutsk National Research Technical University,  
83, Lermontov St., Irkutsk, 664074, Russia,

✉ e-mail: zalivinvg@yandex.ru



Оригинальная статья / Original article

УДК 622.772

## Испытания в промышленных условиях центробежной отсадочной машины для гравитационного обогащения руд цветных и благородных металлов

© М.С. Лучко<sup>а</sup>, П.К. Федотов<sup>б</sup>

<sup>а</sup>Иркутский научно-исследовательский институт благородных и редких металлов и алмазов, г. Иркутск, Россия

<sup>б</sup>Иркутский национальный исследовательский технический университет, г. Иркутск, Россия

**Резюме:** Целью работы являлось изучение центробежно-отсадочного способа обогащения золотосодержащих руд как принципиально нового способа гравитационного обогащения, определение основных факторов, влияющих на процесс обогащения в центробежном поле методом отсадки, выявление способов улучшения основных показателей обогащения методов отсадки в центробежном поле. По заранее разработанной методике были проведены натурные испытания центробежно-отсадочной машины, работающей по принципу отсадки в центробежном поле, в промышленных условиях на золотоизвлекательных фабриках при осуществлении доизвлечения золота из хвостовых продуктов обогащения золотоизвлекательной фабрики № 1 (крупность P80 0,074 мм) и доизвлечения золота из сливов второй стадии гидроциклонирования золотоизвлекательной фабрики № 2. В результате выявлена возможность доизвлечения золота способом отсадки в центробежном поле из отвальных хвостов цианирования и сливов двойного гидроциклонирования. Установлено, что основными факторами, влияющими на процесс разделения методом отсадки в центробежном поле, являются частота вращения отсадочной камеры, частота и амплитуда пульсации подвижного конуса и давление подрешетной воды. Оформлен патент на изобретение центробежно-отсадочного концентратора. Полученные результаты позволяют полагать, что способ отсадки в центробежном поле в ряде случаев может быть предпочтительным при гравитационном обогащении на стадиях предварительного и контрольного обогащения. Высокий выход концентрата не позволяет применять настоящий способ на действующих предприятиях в основных переделах обогащения, в связи с чем необходимо добиться снижения выхода концентрата до 5–10 %.

**Ключевые слова:** центробежная отсадочная машина, гравитационное обогащение, обогащение в центробежном поле, обогащение методом отсадки

**Информация о статье:** Дата поступления 2 июля 2019 г.; дата принятия к печати 23 августа 2019 г.; дата онлайн-размещения 30 сентября 2019 г.

**Для цитирования:** Лучко М.С., Федотов П.К. Испытания в промышленных условиях центробежной отсадочной машины для гравитационного обогащения руд цветных и благородных металлов. *Науки о Земле и недروпользование*. 2019. Т. 42. № 3. С. 349–357.

## Industrial test of the centrifugal jigger for gravity concentration of non-ferrous and precious metal ore

© Maksim S. Luchko<sup>a</sup>, Pavel K. Fedotov<sup>b</sup>

<sup>a</sup>Irkutsk Research Institute of Precious and Rare Metals and Diamonds, Irkutsk, Russia

<sup>b</sup>Irkutsk National Research Technical University, Irkutsk, Russia

**Abstract:** The objective of the work has been to study the centrifugal-jigging method of gold ore concentration as a breakthrough method that reduces the valuable mineral losses in gravity concentration and increases the concentrate grade. Within the framework of the study, the main factors influencing the centrifugal-jigging concentration process, as well as the ways of improving the key parameters of the process, have been investigated. The full-scale testing of the centrifugal jigger has been carried out by the previously developed procedure, in the operation conditions of the gold-processing plants 1 and 2, with additional gold recovery from the plant 1 tailings (P80 0.074 mm) and from the two-stage hydro-cyclone system overflow of the plant 2. The study has shown that gold can be additionally recovered from the cyanidation tailings and two-stage hydro-cyclone systems by jigging in a centrifugal field. The main factors influencing the centrifugal-jigging separation are the jigging chamber rotational speed, the pulsation frequency and amplitude of the movable cone, and the underscreen-water pressure. The centrifugal jigging concentrator has been patented. The results of the study suggest that in certain cases, jigging in a centrifugal field



is a preferential gravity concentration method at the pre-concentration and control stages. For the method to be used at the main stages of the operating plants, the concentrate yield should be reduced to 5–10 %.

**Keywords:** centrifugal jiggling machine, gravity concentration, concentration in a centrifugal field, jiggling concentration

**Information about the article:** Received July 2, 2019; accepted for publication August 23, 2019; available online September 30, 2019.

**For citation:** Luchko M.S., Fedotov P.K. Industrial test of the centrifugal jigger for gravity concentration of non-ferrous and precious metal ore. *Earth Sciences and Subsoil Use*. 2019;42(3):349–357. (In Russ.)

### Введение

В Иркутском научно-исследовательском институте благородных и редких металлов и алмазов (Иргиредмет) создан экспериментальный образец центробежной отсадочной машины (ЦОМ) производительностью от 5 до 15 т/ч, а также проведены заводские, стендовые и опытно-промышленные испытания на золотоизвлекательной фабрике № 1 (ЗИФ № 1) и золотоизвлекательной фабрике № 2 (ЗИФ № 2) (по условиям договоров о конфиденциальности информации название золотоизвлекательных фабрик и место их нахождения не разглашаются). Принцип действия данной ЦОМ основан на одновременном использовании двух факторов: воздействия на сепарируемую минеральную смесь восходящих и нисходящих пульсаций, реализуемых в серийно изготавливаемых отсадочных машинах, и наложения центробежных сил, на основе которых действуют центробежные обогатительные аппараты. Сочетание двух указанных факторов является наиболее современным направлением в разработке конструкций отсадочных машин.

Наибольшую популярность и распространение среди машин этого класса получила созданная в Австралии ЦОМ Kelsey [1], которая испытана и эксплуатируется на ряде предприятий, перерабатывающих золото, железосодержащие руды и руды редких металлов (ильменит, рутил, циркон, танталит, вольфрамит и другие). По данным испытаний эта отсадочная машина эффективно может извлекать железосодержащие минералы крупностью до 5 мкм, при этом извлечение тяжелых минералов крупностью менее 53 мкм достигает 90 %.

По заключению специалистов ЦОМ могут найти широкое применение при переработке золотосодержащих руд и россыпей, обеспечивая непрерывный и регулируемый выход концентрата при высоком извлечении в него золотосодержащих сульфидов, свободного мелкого, тонкого золота и платиноидов, а также других ценных шлиховых минералов (ильменита, магнетита, циркона, рутила и др.).

Принцип действия ЦОМ заключается в принудительном разделении минеральных зерен по удельным весам методом отсадки, основанном на принципе разности в скоростях стесненного падения частиц, при одновременном воздействии на них поступательного потока пульпы, вращательного движения камеры, с помощью которого к частицам прикладывается центробежная сила, в десятки раз превышающая силу тяжести и пульсирующее движение водяного потока [2].

Принцип работы ЦОМ имеет следующий порядок. Продукт поступает в пустотелый вал чаши. Технологическая подрешетная вода поступает в корпус машины через кольцевой коллектор, расположенный в зоне гидроуплотнения, что позволяет кроме основной задачи поддержания уровня давления воды в корпусе машины также отсекаать абразивный материал, не давая ему попадать на кольца гидроуплотнения и изнашивать их. Давление подрешетной воды должно превышать давление в корпусе машины на 0,1 атм.

Вращение чаши машины передается от пустотелого вала, который приводится во движение электродвигателем через ременной редуктор, установленный в

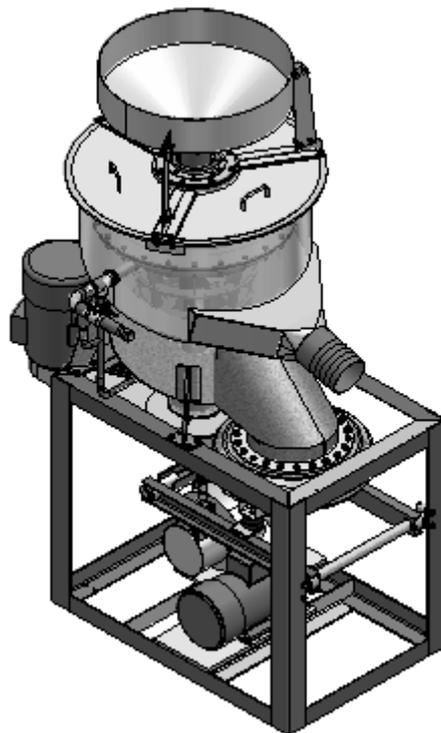


нижней части машины. Чаша состоит из жесткого каркаса и сетчатого корпуса. Размер ячейки сеющей поверхности чаши зависит от крупности обогащаемого материала и может варьироваться от 0,5 до 2 мм [3].

Предварительно в корпус машины может быть загружена искусственная постель (металлическая дробь), которая во время работы машины под действием центробежных сил равномерно распределяется по площади чаши.

Пульсация постели чаши, так же, как и в классических диафрагмовых машинах, передается через подвижный конус, расположенный в нижней части машины. Согласно закону гидравлики (закон Паскаля) [4], давление в замкнутом сосуде, вызванное действием внешней силы, равномерно распределяется во всех направлениях и одинаково в любой точке, поэтому силы, передаваемые подвижным конусом, воздействуют на всю сеющую поверхность вращающейся чаши.

Рабочий процесс начинается с подачи материалов в отсадочную камеру. Материал подается в загрузочную воронку и через пустотелый вал поступает на дно отсадочной камеры, где под действием центробежных сил частицы материала отбрасываются к периферии [5] и движутся по искусственной или естественной постели вверх, к сливному порогу отсадочной камеры. Одновременно частицы материала испытывают действие сил гравитационного разделения отсадкой. Тяжелые частицы проникают через пульсирующую постель [6], пульсация которой создается возвратно-поступательными движениями подвижного конуса, и через проницаемую поверхность отсадочной камеры попадают в неподвижный корпус, где, опускаясь, разгружаются через разгрузочное устройство конуса. Легкая фракция движется вверх и через сливной порог разгружается в хвостовой желоб корпуса [7]. Общий вид ЦОМ представлен на рис. 1, а ее технические характеристики приведены в таблице.



*Рис. 1. Общий вид центробежной отсадочной машины*

*Fig. 1. General view of the centrifugal jigging machine*



### Технические характеристики центробежной отсадочной машины Centrifugal jigging machine specification

Наименование параметра	Значение параметра
Число отсадочных отделений, шт.	1
Рабочая площадь решета, м <sup>2</sup>	0,97
Производительность по исходному питанию, т/ч	до 15
Крупность питания, мм	не более 10
Частота вращения отсадочной камеры, мин <sup>-1</sup>	47–400
Частота качаний подвижного конуса, мин <sup>-1</sup>	180–360
Длина хода подвижного конуса, мм	0–40
Мощность электродвигателя привода отсадочной камеры, кВт	15
Мощность электродвигателя привода подвижного конуса, кВт	7,5
Габаритные размеры, мм:	
длина	2250
ширина	1220
высота	2275
Масса машины, кг	1600

#### Методы исследований

Для получения натуральных данных и составления технологических характеристик, а также выявления конструктивных недостатков был проведен ряд испытаний ЦОМ:

- заводские испытания;
- испытаний в заводских и промышленных условиях ЗИФ № 1;
- испытания в заводских и промышленных условиях на ЗИФ № 2.

Для проведения каждого из испытаний разрабатывались и утверждались методики проведения испытаний.

#### Результаты исследований

Были проведены заводские испытания, предусматривающие проверку прочностных характеристик машины [8], а также произведено определение в первом приближении технологических параметров. Для этого технологический цикл работы машины был замкнут [9] (рис. 2), а именно продукты обогащения, концентрат и хвосты, выделенные из исходного питания после сепарирования, объединялись и заводились в «голову» процесса как «исходное питание».

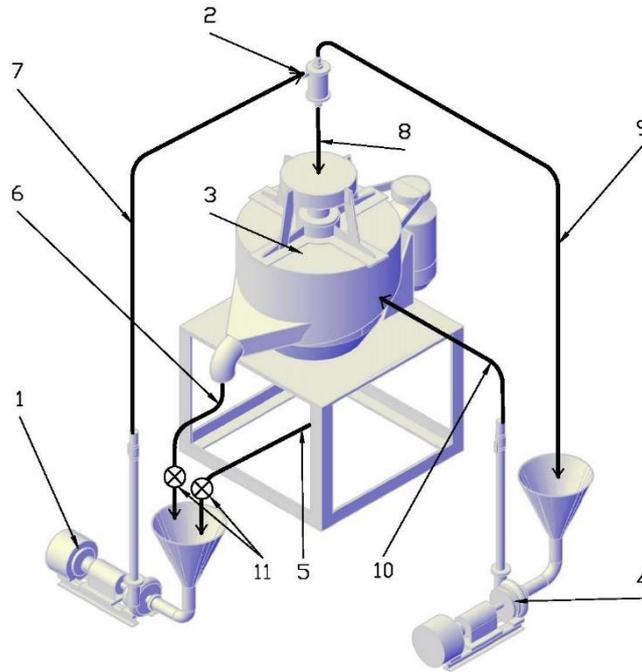
*Испытания в заводских и промышленных условиях на ЗИФ № 1.* Исходным питанием служил весьма труднообогатимый материала с крайне неблагоприятным вещественным составом – отваль-ные хвостов цианирования ЗИФ № 1.

Наибольшее извлечение золота в концентрат ЦОМ получено на уровне 34,5 % при выходе концентрата 26 % и степени концентрации золота 1,3.

*Испытания в заводских и промышленных условиях на ЗИФ № 2.* Во время проведения испытаний ЦОМ на ЗИФ № 2 питанием являлись отваль-ные хвосты технологической схемы ЗИФ крупностью 79–83 % фракции -0,074 мм. Данные хвосты представлены сливом гидроциклонов, полученным после двойной классификации в них слива спиральных классификаторов, в которые поступали хвосты гравитации ЗИФ № 2. Содержание золота в хвостах ЗИФ № 2 (питании ЦОМ) составляло 0,27–0,83г/т; золото в хвостах практически полностью связано с сульфидами, которые представлены большей частью пиритом. Плотность исходного питания ЦОМ (содержание твердого) во время проведения испытаний составила в среднем 12 %.

ЦОМ была установлена в цехе пресс-фильтров фабрики.

Основными показателями оценки эффективности работы центробежного аппарата являлись содержание золота в продуктах обогащения, выход концентрата ЦОМ и извлечение в него золота, которые определялись по результатам опробований [10].



**Рис. 2. Компоновка оборудования при проведении заводских испытаний:**

- 1, 4 – песковый насос; 2 – узел гидроциклонирования; 3 – центробежная отсадочная машина; 5 – концентрат центробежной отсадочной машины; 6 – хвосты центробежной отсадочной машины; 7 – питание короткоконусного гидроциклона ККГЦ-120; 8 – пески ККГЦ-120; 9 – слив ККГЦ-120; 10 – обратная (технологическая), подрешетная вода центробежной отсадочной машины; 11 – точки отбора проб

**Fig. 2. Equipment layout for factory testing:**

- 1, 4 – sand pump; 2 – hydro-cyclone unit; 3 – centrifugal jiggering machine; 5 – centrifugal jiggering machine concentrate; 6 – centrifugal jiggering machine tailings; 7 – KKGЦ-120 short-cone cyclone feed; 8 – KKGЦ-120 underflow; 9 – KKGЦ-120 overflow; 10 – centrifugal jiggering machine circulating (process) underscreen water; 11 – sampling point

Отбор проб концентрата и хвостового продукта осуществлялся полным кратковременным пересечением потоков указанных продуктов.

Определение содержания золота в пробах проводилось методом пробирного анализа в лаборатории фабрики.

В ходе испытаний определялись оптимальные параметры частоты вращения отсадочной камеры и частоты колебаний подвижного конуса ЦОМ.

За основу технологических режимов работы при испытании ЦОМ на ЗИФ № 2 были приняты рациональные технологические режимы, полученные при проведении аналогичных испытаний на ЗИФ № 1.

За время испытания было проведено девять опытов с различными параметрами работы машины.

Средняя производительность при обогащении хвостов фабрики составила 10 т/ч при проектной производительности отсадки до 15 т/ч. Ограничение производительности было обусловлено малой плотностью подаваемого на обогащение материала (не более 12 %), ввиду чего пропускная способность пустотелого питающего вала машины была недостаточной при работе на обводненном исходном питании (при проведении испытания ЦОМ на ЗИФ № 1 плотность исходного питания составляла около 50 %, а производительность машины достигала 24,2 т/ч при средней производительности 15,5–16,5 т/ч).

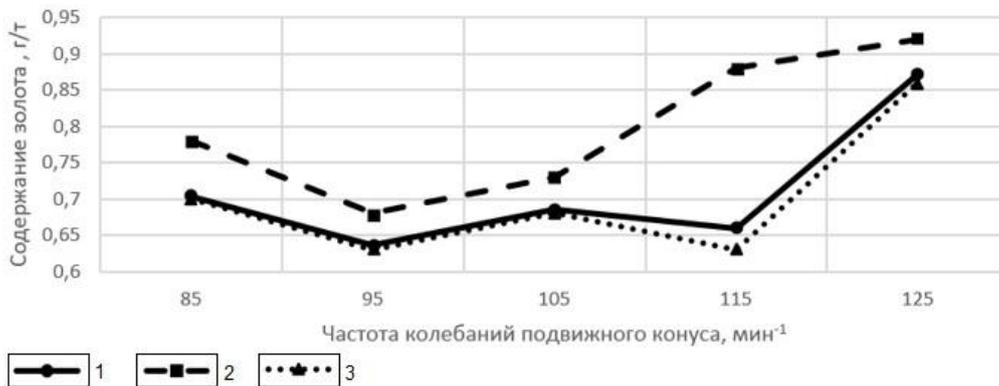
При проведении опытов амплитуда хода подвижного днища изменялась от 9 до 12 мм, частота его пульсации – от 200 до 280 мин<sup>-1</sup>, а частота вращения отсадочной камеры – от 150 до 225 мин<sup>-1</sup>.



Графики зависимостей распределения золота в продукты обогащения от частоты пульсаций подвижного конуса и частоты вращения отсадочной камеры машины представлены на рис. 3 и 4 соответственно.

По результатам проведения испытаний экспериментального образца ЦОМ на ЗИФ № 1 было установлено, что наиболее эффективные технологические показатели (извлечение золота в концентрат и выход концентрата) получены при частоте вращения отсадочной камеры  $200 \text{ мин}^{-1}$ . Примерно при такой же частоте вращения отсадочной камеры

( $200\text{--}250 \text{ мин}^{-1}$ ) были получены наилучшие технологические показатели и при проведении испытания ЦОМ на ЗИФ № 2. Дальнейшему увеличению частоты вращения препятствовало намокание ленточного ремня привода отсадочной камеры, что приводило к его пробуксовке. Намокание происходило вследствие разбрызгивания хвостового продукта ЦОМ и попадания его на внутреннюю поверхность ремня. Данный конструктивный недостаток не представлялось возможным устранить в процессе проведения испытания.

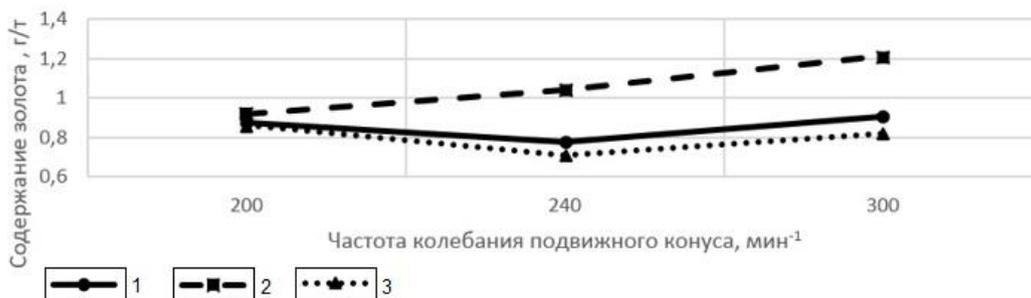


**Рис. 3. График зависимости распределения золота в продуктах обогащения центробежной отсадочной машины от частоты пульсаций подвижного конуса при частоте вращения отсадочной камеры  $200 \text{ мин}^{-1}$ :**

1 – исходное питание; 2 – концентрат; 3 – хвосты

**Fig. 3. Distribution of gold in the centrifugal jigging concentration products as a function of the rolling cone pulsation frequency, with the jigging chamber rotation frequency of  $200 \text{ мин}^{-1}$ :**

1 – initial feed; 2 – concentrate; 3 – tailings



**Рис. 4. График зависимости распределения золота в продуктах обогащения центробежной отсадочной машины от частоты вращения отсадочной камеры при постоянной частоте пульсаций подвижного конуса  $125 \text{ мин}^{-1}$ :**

1 – исходное питание; 2 – концентрат; 3 – хвосты

**Fig. 4. Distribution of gold in the centrifugal jigging concentration products as a function of the jigging chamber rotation frequency, with a constant pulsation frequency of the rolling cone,  $125 \text{ мин}^{-1}$ :**

1 – initial feed; 2 – concentrate; 3 – tailings



На графиках зависимостей распределения золота в продукты обогащения ЦОМ от частоты пульсаций подвижного конуса при частоте вращения отсадочной камеры  $200 \text{ мин}^{-1}$  и распределения золота в продукты обогащения ЦОМ от частоты вращения отсадочной камеры при постоянной частоте пульсаций подвижного конуса  $125 \text{ мин}^{-1}$  (см. рис. 3, 4) показана зависимость извлечения золота в концентрат от частоты вращения отсадочной камеры  $\omega$  и частоты колебаний подвижного конуса аппарата  $\eta$ ; она увеличивается с возрастанием  $\omega$  и  $\eta$ . Выход концентрата  $\gamma$  при проведении экспериментов практически не изменялся.

Появились основания полагать, что с увеличением  $\omega$  и  $\eta$  извлечение золота в концентрат ЦОМ будет возрастать.

При обогащении концентрата ЦОМ на концентрационном столе происходило образование концентрата стола в виде сульфидной дорожки шириной 3–4 см, в которой при его остановке под нагрузкой визуально наблюдались зерна золота микронного размера. При этом из-за большой перегрузки концентрационный стол работал в неоптимальном режиме, в связи с чем извлечение золота в его концентрат из концентрата ЦОМ не превышало 41–42 %.

Результаты испытаний на ЗИФ № 2 подтвердили технологическую эффективность работы аппарата и ее зависимость от частоты вращения отсадочной камеры и частоты колебаний подвижного конуса, которая была выявлена при проведении испытаний аппарата на ЗИФ № 1. Более высокие технологические показатели, достигнутые при испытании на ЗИФ № 2, объясняются устранением ряда конструктивных недостатков, выявленных при испытании на ЗИФ № 1, особенно изменениями конструкции гидроуплотнения, а также более благоприятным вещественным составом обогащаемого сырья.

*Повторные испытания на ЗИФ № 1.* Данные испытания проводились на модернизированной конструкции ЦОМ,

внесенные изменения послужили значительному улучшению качества получаемых продуктов обогащения.

Переработка исходной руды на ЗИФ № 1 осуществляется по развернутой схеме, предусматривающей стадийное дробление и измельчение с последующей классификацией в спиральных классификаторах и гидроциклонах и направлением на цианирование тонкоизмельченных продуктов. Свободное золото в отвальных хвостах цианирования практически отсутствует, и ценный компонент находится в тесной ассоциации с тонкозернистыми сульфидами (пиритом), часть из которых присутствует в виде тонкой вкрапленности в сопутствующих минералах и с породообразующими минералами.

Вышеизложенное свидетельствует о том, что продукт, используемый для опытно-промышленных испытаний, по крупности и форме нахождения золота, крупности материала и сульфидов, с которыми ассоциирует часть золота, является труднообогатимым гравитационными методами, в том числе на ЦОМ.

### **Заключение**

Испытания ЦОМ проводили в соответствии со специально разработанными и утвержденными методиками.

Технологическую эффективность оценивали по извлечению золота в концентрат с учетом выхода концентрата.

Основными факторами, влияющими на технологический процесс при обогащении в ЦОМ, являются [11]:

- производительность машины – до 15 т/ч;
- частота колебаний подвижного конуса – 200 и 240 мм;
- частота вращения отсадочной камеры – 250, 300, 350 и 400 об./мин;
- давление подрешетной воды – 2,5–3 МПа.

Эти параметры подвергались изменениям в соответствии с разработанным алгоритмом и методикой испытаний.

В целом технологические показатели, полученные в ходе проведения



опытно-промышленных испытаний машины на сырье с неблагоприятным вещественным составом (хвостах цианирования) на ЗИФ № 1, были признаны вполне удовлетворительными.

Наилучшие показатели при обогащении хвостов цианирования фабрики на модернизированной ЦОМ соответствуют выходу концентрата 10,87 и 16,00 %, извлечению золота 21,13 и 23,73 %, содержанию золота в исходном питании 576 и 383 мг/т, в хвостах – 510 и 360 мг/т, в концентрате – 1120 и 540 мг/т соответственно.

ЦОМ оценивается как перспективный обогатительный аппарат, в котором удачно реализовано сочетание центробежного ускорения, получаемого обогащаемым материалом за счет вращения отсадочной камеры, и поступательных движений подвижного конуса машины.

По результатам выполненной работы получен патент на изобретение № 2430784 РФБ МПК В03В 5/32 «Центробежно-отсадочный концентратор» [12].

### Библиографический список

1. Батчер Г., Лапланте А.Р. Извлечение золота на месторождении Гранни Смит с применением отсадочной машины Келси J1800 // *Academia*. [Электронный ресурс]. URL: <http://academia.edu> (02.09.2019).
2. Прогрессивные методы обогащения и комплексной переработки природного и техногенного минерального сырья / ред. В.А. Чантурия. Карганда: ТОО Арко, 2014. 624 с.
3. Маньков В.М., Тарасова Т.Б. Применение центробежно-гравитационного метода извлечения мелкого золота из россыпей // *Обогащение руд*. 1999. № 6. С. 3–8.
4. Гайдуков В.П. Гидравлика. М.; Л.: Гостоптехиздат, 1946. 229 с.
5. Алгебраистова Н.К., Макшанин А.В., Бурдакова Е.А., Маркова А.С. Обогащение благороднометалльного сырья на центробежных аппаратах // *Цветные металлы*. 2017. № 1. С. 18–22.
6. Верхотуров М.В., Самойлов В.Г., Гольсман Д.А. Механизм отсадки ширококлассифицированного материала // *Цветные металлы*. 2006. № 5. [Электронный ресурс]. URL: <http://www.rudmet.com/journal/811/article/12182/> (02.09.2019)
7. Вайсберг Л.А., Кускова Я.В. Совершенствование круглых концентрационных столов как развитие гравитационных методов обогащения // *Обогащение руд*. 2017. № 4. С. 54–60.
8. Проников А.С. Надежность машин. М.: Машиностроение, 1978. 592 с.
9. Васильев А.М., Кусков В.Б. Особенности процесса концентрации тонкозернистых материалов в короткоконусном гидроциклоне // *Обогащение руд*. 2018. № 2. С. 30–34.
10. Карпенко Н.В. Опробование и контроль качества продуктов обогащения руд. М.: Недра, 1987. 215 с.
11. Соломин К.В. Обогащение россыпных месторождений полезных ископаемых. М.: Металлургиздат, 1961. 399 с.
12. Пат. № 2430784 РФБ. МПК В03В 5/32. Центробежно-отсадочный концентратор / В.М. Маньков, М.С. Лучко, С.А. Патрин. Заявл. 29.12.2009; опублик. 10.10.2011.

### References

1. Batcher G, Laplante AR. Recovery of Gold Carriers at the Granny Smith Mine Using Kelsey Jigs J1800. *Academia = Academy*. Available from: <http://academia.edu> [Accessed 2nd September 2019].
2. Chanturiya VA. *Advanced methods for beneficiation and complex processing of natural and technogenic raw mineral materials*. Karaganda: TOO Arko; 2014. 624 p. (In Russ.)
3. Man'kov VM, Tarasova TB. Centrifugal gravity method for fine gold recovery from gravel deposits. *Obogashchenie rud = Ore Dressing*. 1999;6:3–8. (In Russ.)
4. Gaidukov VP. *Hydraulics*. Moscow; Leningrad: Gostoptekhizdat; 1946. 229 p. (In Russ.)
5. Algebraistova NK, Makshinin AV, Burdakova EA, Markova AS. Centrifugal processing of precious metal raw materials. *Tsvetnye metally = Non-ferrous Metals*. 2017;1:18–22. (In Russ.)
6. Verkhoturov MV, Samoilov VG, Golsman DA. Jigging procedure for the broad-classified material. *Tsvetnye metally = Non-ferrous Metals*. 2006;5. Available from: <http://www.rudmet.com/journal/811/article/12182/> [Accessed 2nd September 2019].
7. Vaisberg LA, Kuskova YaV. Improvement of circular concentrating tables as development of gravity concentration methods. *Obogashchenie rud = Ore Dressing*. 2017;4:54–60. (In Russ.)
8. Pronikov AS. *Machine reliability*. Moscow: Mashinostroenie; 1978. 592 p. (In Russ.)



9. Vasil'ev AM, Kuskov VB. Specific features of the concentration process for fine-grained materials in a short-cone hydrocyclone. *Obogashchenie rud = Ore Dressing*. 2018;2:30–34. (In Russ.)

10. Karpenko NV. *Sampling and quality control of ore-concentration products*. Moscow: Nedra; 1987. 215 p. (In Russ.)

11. Solomin KV. *Concentration of gravel deposits of minerals*. Moscow: Metallurgizdat; 1961. 399 p. (In Russ.)

12. Man'kov VM, Luchko MS, Patrín SA. *Centrifugal-jigging concentrator*. Patent RFb, no. 2430784; 2011. (In Russ.)

### Критерии авторства / Authorship criteria

Лучко М.С., Федотов П.К. написали статью, имеют равные авторские права и несут одинаковую ответственность за плагиат.

Maksim S. Luchko and Pavel K. Fedotov are the authors of the article, hold equal copyright and bear equal responsibility for plagiarism.

### Конфликт интересов / Responsibility for plagiarism

Авторы заявляют об отсутствии конфликта интересов.

The authors declare that there is no conflict of interests regarding the publication of this article.

### Сведения об авторах / Information about the authors



**Лучко Максим Сергеевич,**

аспирант, ведущий инженер,  
Иркутский научно-исследовательский институт  
благородных и редких металлов и алмазов,  
664025, г. Иркутск, Бульвар Гагарина, 38, Россия,  
✉ e-mail: maxuse@mail.ru

**Maksim S. Luchko,**

Postgraduate, Senior Engineer,  
Irkutsk Research Institute of Precious and Rare Metals and Diamonds,  
38 Gagarin Blvd., Irkutsk, 664025, Russia,  
✉ e-mail: maxuse@mail.ru



**Федотов Павел Константинович,**

доктор технических наук, профессор,  
профессор кафедры обогащения полезных ископаемых  
и охраны окружающей среды им. С.Б. Леонова,  
Институт недропользования,  
Иркутский национальный исследовательский технический университет,  
664074, г. Иркутск, ул. Лермонтова, 83, Россия,  
e-mail: fedotov@istu.edu

**Pavel K. Fedotov,**

Dr. Sci. (Eng.), Full Professor,  
Professor, Department of Mineral Processing  
and Environmental Protection n.a. S.B. Leonov,  
Institute of Subsoil Use,  
Irkutsk National Research Technical University,  
83, Lermontov St., Irkutsk, 664074, Russia,  
e-mail: fedotov@istu.edu



Оригинальная статья / Original article  
УДК 622.765.061

## Изыскание новых реагентов-собираелей для окисленных сурьмяных руд и оценка их флотационной активности по результатам квантово-химических расчетов на примере сурьмяной руды месторождения Жипхоша

© Г.В. Михеев<sup>а</sup>, С.А. Богйдаев<sup>б</sup>

<sup>а,б</sup>Иркутский научно-исследовательский институт благородных и редких металлов и алмазов, г. Иркутск, Россия

**Резюме:** Руды сурьмяных месторождений содержат сульфидные (антимонит, джемсонит, буланжерит и др.) и окисленные формы металла (стибиконит, валентинит, сервантит и др.). Сульфидные формы извлекаются хорошо, а окисленные являются упорными ко всем процессам обогащения, и в настоящий момент нет технологий по получению окисленного концентрата сурьмы надлежащего качества. Исходя из литературных источников, из всех известных способов извлечения окислов сурьмы из сурьмяных руд самым эффективным на сегодняшний день является флотация. Для флотации сурьмяных руд применяют раздельную флотацию: сульфидную и окисленную. Низкая эффективность флотации окисленных форм сурьмы в присутствии известных собирателей, модификаторов и активаторов наводит на необходимость разработки новых эффективных реагентов с разработкой режимных параметров флотационного обогащения. В данной работе предлагается использование нового комплексного реагента-собираеля при флотации сурьмяной руды месторождения Жипхоша и приводится квантово-химический расчет для определения наличия взаимодействия реагента с минералами окисленных форм сурьмы. Установлено, что применение комплексного собирателя КР-1 при флотации (в соотношении 1:1:0,2) приводит к повышению флотационных свойств окислов сурьмы путем более эффективного воздействия на поверхность мономинерала (линз, пленок). Этот факт доказан при выполнении квантово-химического расчета, в котором рассчитанная энергия взаимодействия между мономинералом и реагентом составила 24,1 кДж/моль, что характерно для донорно-акцепторных взаимодействий. На пробе сурьмяной руды месторождения Жипхоша с содержанием сурьмы 2 % подтверждена эффективность применения комплексного собирателя КР-1 для флотации окисленных минералов металла. Извлечение сурьмы возрастает на 9,1 % при качестве концентрата 40 %, хвосты при этом снижаются с 1,42 до 1,12 %.

**Ключевые слова:** флотация, обогащение, сурьма, извлечение, квантовая химия

**Информация о статье:** Дата поступления 11 июля 2019 г.; дата принятия к печати 16 августа 2019 г.; дата онлайн-размещения 30 сентября 2019 г.

**Для цитирования:** Михеев Г.В., Богйдаев С.А. Изыскание новых реагентов-собираелей для окисленных сурьмяных руд и оценка их флотационной активности по результатам квантово-химических расчетов на примере сурьмяной руды месторождения Жипхоша. *Науки о Земле и недропользование*. 2019. Т. 42. № 3. С. 358–365.

## Exploration for new collecting agents for oxidized antimony ores and estimation of their flotation activity based on the quantum-chemical calculation results: a case study of the Zhipkoshka deposit

© Gregory V. Miheev<sup>а</sup>, Sergey A. Bogidayev<sup>б</sup>

<sup>а,б</sup>Irkutsk Research Institute of Precious and Rare Metals and Diamonds, Irkutsk, Russia

**Abstract:** The ores of antimony deposits contain sulfide (antimonite, jamesonite, boulangerite, etc.) and oxidized forms of metal (stibiconite, valentinite, cervantite, etc.). The sulfide forms are well recoverable, while the oxidized ones are resistant to all enrichment processes. Thus there is currently no technology for obtaining a proper-quality oxidized antimony concentrate. The survey of the known methods of extracting antimony oxides from antimony ores shows that flotation is considered the most effective method. In the case of antimony ores, separate (sulfide and



oxidized) flotation is used. The efficiency of oxidized antimony forms flotation using the existing collectors, modifiers and activators, is low, which makes it necessary to develop higher-efficiency agents and operation parameters of the enrichment process. The present work suggests using a new complex collecting agent in the antimony ore flotation (the Zhipkoshka deposit) and describes a quantum-chemical calculation that allows determining the interaction of the reagent with the oxidized antimony mineral forms. It has been found that the flotation using the complex KR-1 collector (in a ratio of 1:1:0.2) results in higher flotation properties of the antimony oxide due to the bigger effect on the monogene surface (lenses, films). This fact is proven by the quantum-chemical calculation that gives the calculated energy of the monogene-agent interaction of 24.1 kJ/mole, which is typical of donor-acceptor interactions. The effectiveness of using the complex KR-1 collector for oxidized metal minerals flotation has been confirmed for the antimony ore sample with an antimony content of 2%. With the concentrate quality of 40 %, the antimony recovery increases by 9.1 %, while the tailings amount decreases from 1.42 % to 1.12 %.

**Keywords:** flotation, enrichment, antimony, extraction, quantum chemistry

**Information about the article:** Received July 11, 2019; accepted for publication August 16, 2019; available online September 30, 2019.

**For citation:** Miheev G.V., Bogidayev S.A. Exploration of new collecting agents for oxidized antimony ores and estimation of their flotation activity based on the quantum-chemical calculation results: a case study of the Zhipkoshka deposit. *Earth Sciences and Subsoil Use*. 2019;42(3):358–365. (In Russ.)

## Введение

Сурьма находит широкое применение в технике в виде сплавов и соединений – их насчитывается около двухсот: в типографии, в химическом машиностроении, для изготовления труб, в электронной промышленности, при изготовлении аккумуляторов, в производстве полупроводниковых приборов, в современной ядерной науке, в текстильной промышленности, в производстве невозгораемых тканей и красок, ее используют также для изготовления оптического (просветленного) стекла, в медицине, в сельском хозяйстве и многих других промышленных областях.

Географическое размещение запасов сурьмы в России не так многогранно – они расположены в Читинской области и Забайкалье, в Красноярском крае и Якутии. Основные потребители сырья находятся в европейской части России.

Крупнейшим сурьмяносодержащим месторождением в настоящее время в России является месторождение Жипкоша, находящиеся в Восточном Забайкалье. По мировым запасам сурьмы Россия занимает второе место после Китая, на долю нашей страны приходится более 20 % данных запасов. Тем не менее потребление сурьмы в России гораздо ниже, чем в развитых странах, таких как США, Германия, Китай.

На сегодняшний день одной из проблем по выпуску сурьмяного концентрата является относительно низкая цена и низкое качество концентратов, поэтому силы производителей направлены на сокращение расходов при повышении качества продукции и увеличении объемов производства. Естественно, что для обогащения сурьмы необходимо применение достаточно недорогих реагентов и малозатратных процессов обогащения. Целью выполненных исследований являлось извлечение сурьмы в концентрат флотации сурьмяных руд Восточного Забайкалья за счет введения в схему дополнительной флотации окисленных форм сурьмы путем внедрения недорогих реагентов-собираателей.

## Методы исследований

В работе использованы данные исследований по обогащению сурьмяной руды месторождения Жипкоша. Выполнены флотационные испытания комплексного реагента КР-1 в качестве собирателя окисленной формы сурьмы. Проведен квантово-химический расчет взаимодействия реагента КР-1 с окисленным минералом сурьмы  $Sb_2O_3$ .

## Результаты исследований

При проведении исследований руды месторождения Жипкоша потери с хвостами флотации составили 20,6 %



при содержании сурьмы, равном 1,99 %<sup>1-3</sup> [1–10].

Извлечение оксидов сурьмы флотацией – одна из наиболее трудных проблем в технологии переработки сурьмяных руд [5]. За прошедшие годы много исследований было связано с флотацией сурьмяных окисленных руд, но ни одна из технологий пока не доведена до промышленного внедрения.

Поиск эффективных реагентов для флотации окисленных сурьмяных руд продолжается. Ниже приводятся некоторые интересные разработки в этом направлении<sup>4</sup>.

1. При активации оксидов сурьмы марганцем (30 мг/л) и использовании в качестве коллектора гидроксамовой кислоты (80 мг/л) флотация их заметно улучшается (извлечение – 95 %). В отсутствии солей марганца извлечение достигало всего 42 %. В результате активации поверхности оксидов сурьмы марганцем усиливается взаимодействие поверхности с коллектором, что приводит к снижению образования оксидов (улучшению флокуляции) и, соответственно, к уменьшению активации минералов пустой породы.

2. При флотации окисленной сурьмяной руды с содержанием сурьмы 3,04 % и использовании октангидросамовой кислоты, эмульгатора синтекс (сложного алкилсульфата), трансформаторного масла и медного купороса при интенсивном их перемешивании получен сурьмяный концентрат с содержанием 12,66 % сурьмы при извлечении 88,3 %.

3. Исследован механизм активации окисленных минералов сурьмы катионами меди<sup>5</sup> [6], показано, что катионы

меди могут эффективно способствовать флотации оксидов сурьмы при концентрации катионов меди 100 мг/л и pH = 4.

Указанные выше способы флотации окисленных руд были проверены на хвостах сульфидной флотации, полученных при полупромышленных испытаниях гравитационно-флотационной и флотационной схем обогащения руды месторождения Жипхоша (хвостах сульфидной флотации), а также на исходном питании флотации. При проведении опытов использованы реагенты, синтезированные в Иркутском институте химии им. А. Е. Фаворского СО РАН: олеат натрия 69 % + моноалкилтрисоксипропиленгликоль 3,2 % (P-4), олеат натрия 64,5 % + алкилдиметилбензиламмоний олеат 5,4 % (P-5), N,N-бис(3винилоксиэтокси-2-гидрокси-пропил)амин (P-7), алкилсульфаты (P-8), цис-9-октадецерпгидроксамовая кислота 40 % (P-10), натриевая соль гидроксамовой кислоты из олеиновой кислоты ~ 20 % (P-12). Проверен комплексный реагент КР-1, который представляет собой однородный водный раствор трех составляющих: хлопкового соапстока («Даллес»), омыленных жирных талловых кислот (БТ-1С) и диспергатора. При приготовлении комплексного реагента КР-1 в качестве диспергатора использовался Аспарал-Ф-тетранатриевая соль N-n-октадецил-N сульфосукциноиласпаргиновой кислоты. Также были проверены известные способы с использованием карбоновых кислот (на примере олеиновой кислоты) и аполярных реагентов (керосина, трансформаторного масла).

Результаты опытов с использованием выбранных реагентов представлены в табл. 1, 2.

<sup>1</sup> Тихонова О.Н. Справочник по проектированию рудных обогатительных фабрик. В 2 кн. Кн. 1. М.: Недра, 1988. 373 с.

<sup>2</sup> Абрамов А.А. Переработка, обогащение и комплексное использование твердых полезных ископаемых: учебник для вузов. В 3 т. М.: Изд-во МГГУ, 2001. 510 с.

<sup>3</sup> Авдохин В.М. Основы обогащения полезных ископаемых: учебник для вузов. В 2 т. Т. 2. Технология обогащения полезных ископаемых. М.: Изд-во МГУ, 2006. 310 с.

<sup>4</sup> Тихонова О.Н. Справочник по проектированию рудных обогатительных фабрик. В 2 кн. Кн. 1. М.: Недра, 1988. 373 с.

<sup>5</sup> Абрамов А.А. Переработка, обогащение и комплексное использование твердых полезных ископаемых: учебник для вузов. В 3 т. М.: Изд-во МГГУ, 2001. 510 с.



Таблица 1

**Показатели флотации хвостов технологии для обогащения  
 сурьмяной руды с использованием режимов,  
 рекомендованных для повышения извлечения окисленной сурьмы**

Table 1

**Indicators of tailings flotation technology for antimony ore enrichment  
 using the recommended modes enhancing the oxidized antimony recovery**

Номер опыта	Наименование продукта	Выход, %	Содержание сурьмы, %	Извлечение сурьмы, %	Реагентный режим, расход реагентов на 1 т, г
1	Концентрат	29,8	2,25	44,7	KMnO <sub>4</sub> – 120, P-12 – 320, P-8 – 12, T-92 – 30
	Хвосты	70,2	1,18	55,3	
	Исходный: хвосты сульфидной флотации (по балансу)	100	1,5	100	
2	Концентрат	9,2	2,51	15,3	KMnO <sub>4</sub> – 120, P-12 – 120, P-8 – 10, T-92 – 30
	Хвосты	90,8	1,41	84,7	
	Исходный: хвосты сульфидной флотации (по балансу)	100	1,51	100	
3	Концентрат	7,7	2,9	15,2	CuSO <sub>4</sub> – 200, P-10 – 200, P-8 – 10, T-92 – 60, трансформаторное масло – 200
	Хвосты	92,3	1,35	84,8	
	Исходный: хвосты сульфидной флотации (по балансу)	100	1,47	100	
4	Концентрат	8,5	2,35	13,4	CuSO <sub>4</sub> – 200, P-10 – 200, P-8 – 10, керосин – 200, T-92 – 60
	Хвосты	91,5	1,41	86,6	
	Исходный: хвосты сульфидной флотации (по балансу)	100	1,49	100	
5	Концентрат	10,3	2,83	19,2	pH = 4 (H <sub>2</sub> SO <sub>4</sub> – 300), CuSO <sub>4</sub> – 400 (100 мг/л), БКК – 150, T-92 – 60
	Хвосты	89,7	1,37	80,8	
	Исходный: хвосты сульфидной флотации (по балансу)	100	1,52	100	
6	Концентрат	12,6	2,48	20,8	pH = 4 (H <sub>2</sub> SO <sub>4</sub> – 300), CuSO <sub>4</sub> – 600, БКК – 150, T-92 – 60
	Хвосты	87,4	1,36	79,2	
	Исходный: хвосты сульфидной флотации (по балансу)	100	1,5	100	
7	Концентрат	14,8	3,15	32,7	Ж. ст. – 200, KP-1 – 420+300, T-92 – 60
	Хвосты	85,9	1,12	67,3	
	Исходный: хвосты сульфидной флотации (по балансу)	100	1,43	100	

Из всех проверенных реагентных режимов обращает на себя внимание режим с использованием KP-1 (см. опыт 7, табл. 1): извлечение в черновой концентрат составило 32,7 % при содержании сурьмы 3,15 %, содержание сурьмы в хвостах флотации снизилось до 1,12 % против 1,43 %.

Далее была проведена серия опытов с реагентом KP-1 для оптимизации процесса флотации. В результате исследований по флотационному обогащению руды месторождения Жипхоша выяснилось, что с использованием в окисленном цикле флотации комплексного реагента KP-1 технологическое извлечение ценного



Таблица 2

Показатели флотации хвостов технологии для обогащения сурьмяной руды  
с использованием известных режимов окисленной флотации

Table 2

Indicators of tailings flotation technology for antimony ore enrichment  
using the known oxidized flotation modes

Номер опыта	Наименование продукта	Выход, %	Содержание сурьмы, %	Извлечение сурьмы, %	Реагентный режим, расход реагентов на 1 т, г
1	Концентрат основной флотации	4,2	2,65	7,5	Основная флотация, $t = 10$ мин, $\text{KMnO}_4 - 120$ , $\text{Pb}(\text{NO}_3)_2 - 150$ , БКК – 100, Т-92 – 60. Окисленная флотация, $t = 10$ мин, $\text{FeSO}_4 - 500$ , БКК – 50, Ж. ст. – 800, олеиновая кислота – 300+100, Т-92 – 30
	Концентрат окисленной флотации, в т. ч:	6,4	2,63	7,6	
	концентрат перерешетки	0,2	5,81	0,8	
	промпродукт перерешетки	6,2	1,64	6,8	
	Хвосты флотации	89,4	1,41	84,9	
	Исходный: хвосты сульфидной флотации (по балансу)	100	1,49	100	
2	Концентрат основной флотации	4,3	2,65	7,6	Основная флотация, $t = 10$ мин, $\text{KMnO}_4 - 120$ , $\text{Pb}(\text{NO}_3)_2 - 150$ , БКК – 100, Т-92 – 60. Окисленная флотация, $t = 10$ мин, $\text{FeSO}_4 - 500$ , БКК – 50, олеиновая кислота – 300, трансформаторное масло – 80, Т-92 – 30
	Концентрат окисленной флотации, в т. ч:	26,5	1,81	32	
	концентрат перерешетки	7,6	1,91	9,7	
	промпродукт перерешетки	18,9	1,77	22,3	
	Хвосты флотации	69,2	1,31	60,4	
	Исходный: хвосты сульфидной флотации (по балансу)	100	1,5	100	
3	Концентрат основной флотации	4,6	2,71	8,4	Основная флотация, $t = 10$ мин, $\text{KMnO}_4 - 120$ , $\text{Pb}(\text{NO}_3)_2 - 150$ , БКК – 100, ДМДК – 100, Т-92 – 60. Окисленная флотация, $t = 10$ мин, керосин – 200, Р-12 – 200, Р-8 – 10, Т-92 – 30
	Концентрат окисленной флотации	5,9	1,98	7,9	
	Хвосты флотации	89,6	1,38	83,7	
	Исходный: хвосты сульфидной флотации (по балансу)	100	1,48	100	
4	Концентрат основной флотации	5,8	2,47	9,6	Основная флотация, $t = 10$ мин, $\text{KMnO}_4 - 120$ , $\text{Pb}(\text{NO}_3)_2 - 150$ , БКК – 100, ДМДК – 100, Т-92 – 60. Окисленная флотация, $t = 10$ мин, трансформаторное масло – 200, Р-12 – 200, Р-10 – 10, Т-92 – 30
	Концентрат окисленной флотации	6,2	1,85	7,7	
	Хвосты флотации	88	1,4	82,7	
	Исходный: хвосты (по балансу)	100	1,49	100	



компонента возможно повысить на 6,5 % при качестве концентрата 19,8 %. Результаты исследований с использованием комплексного реагента КР-1 рекомендуется использовать при разработке технологии обогащения смешанных и окисленных сурьмяных руд других месторождений (Илинское, Сарылахское, Удереиское и др.).

В связи с вышеизложенным для построения адекватной модели процесса флотации были проведены квантово-химические исследования структурных и электронных характеристик взаимодействия компонентов реагента и минералов окисленной сурьмы<sup>6–9</sup> [11, 12].

Основной задачей квантовой химии является решение уравнения Шредингера и его релятивистского варианта (уравнение Дирака) для атомов и молекул. Уравнение Шредингера решается аналитически, учитывая следующие ограничения: жесткий ротатор, гармонический осциллятор, одноэлектронная система.

Ab initio (лат. «из первых принципов», «с начала») – основной метод расчета в современной квантовой химии. Исходными данными служат заряды ядер и их положения в молекуле или кристалле и наборы базисных функций (как правило, слейтеровского или гауссового типов). Эквивалентное название – неэмпирический расчет. Это наиболее точный из вычислительных методов. Обычно состоит в решении одноэлектронных уравнений Хартри – Фока или Кона – Шэма с учетом электронной корреляции.

В результате кванто-химического расчета были построены математические модели процесса флотации и выведены основные следующие критерии<sup>10</sup> [13–16]:

– при флотации сурьмы фотореагентом КР-1, основным компонентом которого является олеиновая кислота, механизм процесса флотации обусловлен взаимодействием электронных оболочек сурьмы и кислорода группы  $\text{COO}^-$ ;

– результаты расчета указывают на то, что связь кислорода в составе  $\text{Sb}_2\text{O}_3$  является чисто ионной;

– энергия активации при флотации окислов сурьмы с помощью реагента КР-1 составила 10,5 кДж/моль, что ниже энергии химических связей и характерно для донорно-акцепторных взаимодействий, то есть закрепление собирателя КР-1 на минерале окисленной сурьмы происходит эффективно.

### Заключение

При изучении литературных источников по обогащению сурьмы выяснилось, что основной проблемой при обогащении металла является извлечение окисленных форм сурьмы, из-за чего потери по извлечению составляют до 40 % в зависимости от месторождения. В данной статье определен факт повышения извлечения сурьмы за счет доизвлечения окисленных форм металла при достаточно хорошем качестве концентрата 19,8 %, который можно смешивать с сульфидным концентратом и реализовывать на перерабатывающие заводы. Стоит отметить, что ранее такого качества достигали только после доводки окисленного концентрата, но при этом возрастали потери сурьмы за счет сокращения выхода концентрата и, следовательно, происходило падение извлечения металла в товарный продукт.

С помощью квантово-химического расчета определено, что комплексный реагент-собиратель КР-1 эффективно закрепляется на минерале окисленной сурьмы за счет синергетического

<sup>6</sup> Мязин В.П., Наркелюн Л.Ф., Трубочев А.И., Татаринев А.Н. Обогащение полезных ископаемых: конспект лекций. Чита: Изд-во ЧитГТУ, 1999. 123 с.

<sup>7</sup> Богданова О.С. Справочник по обогащению руд. Подготовительные процессы. М.: Недра, 1982. 360 с.

<sup>8</sup> Грибов Л.А. Квантовая химия: учебник для студентов вузов. М.: Гардарики, 1999. 390 с.

<sup>9</sup> Барановский В.И. Квантовая механика и квантовая химия: учеб. пособие. М.: Академия, 2008. 384 с.

<sup>10</sup> Венер М.В. Компьютерное моделирование супрамолекулярных систем и нано-структур: учеб. пособие. М.: Изд-во РХТУ, 2008. 120 с.



эффекта компонентов, составляющих реагент.

На основании проведенных исследований работы будут продолжаться в

направлении оптимизации процесса флотации окисленных форм сурьмы с целью увеличения извлечения и качества концентратов.

#### Библиографический список

1. Гольман А.М., Чантурия В.А. Новые процессы в комбинированных схемах обогащения полезных ископаемых. М.: Наука, 1989. 210 с.
2. Solozhenkin P.M., Alekseev A.N. Innovative processing and hydrometallurgical treatment methods for complex antimony ores and concentrates. Part I // *Journal of Mining Science*. 2010. Vol. 46. № 2. P. 203–209.
3. Баранова Т.В., Соловьева Л.С. Обогащение руд процессом тяжелосредней сепарации // *Золотодобыча*. 2008. № 118. [Электронный ресурс]. URL: <https://zolotodb.ru/article/10091> (10.09.2019).
4. Xiao Liping, Liao Pinjun, Hu Weibai. Activation of Cu<sup>2+</sup> ions on the flotation of fine antimony oxides. *Journal of Cent.-South Institute of Mining and Metallurgy*. 1985. № 4. P. 63–75.
5. Орел М.А., Розенфельд С.Ш. Обогащение комплексных ртутно-сурьмяно-флюоритовых руд // *Комплексная переработка полиметаллических руд*. М.: Metallurgia, 1965. С. 12–14.
6. Васильев В.Г. Сурьмяные оруденения Восточного Забайкалья // *Новый век – Новые открытия: материалы Межрегион. конф., посвящ. 40-летию Забайкальского комплексного научно-исследовательского института*. Чита: Изд-во ЧТГУ, 2001. С. 65–76.
7. Пендин А.А., Леонтьевская П.К., Казак А.С. Структурные характеристики водных растворов одноосновных кислот и щелочей // *Журнал физической химии*. 1996. Т. 70. № 11. С. 1965–1970.
8. Соложенкин П.М., Зинченко З.И. Обогащение сурьмяных руд. М.: Наука, 1985. 179 с.
9. Матвеева Т.Н., Громова Н.К., Ланцова Л.Б. Влияние таннина на адсорбцию комбинированного собирателя и флотацию стибнита и арсенопирита из комплексных руд // *Физико-технические проблемы разработки полезных ископаемых*. 2017. № 6. С. 155–162.
10. Мязин В.П. Флотационное обогащение и металлургия сурьмяных руд: монография. Чита: Изд-во ЧТГУ, 2015. 156 с.
11. Левин А.А. Введение в квантовую химию твердого тела: химическая связь и структура энергетических зон в тетраэдрических полупроводниках: монография. М.: Химия, 1974. 238 с.
12. Ивановский А.Л. Квантовая химия в материаловедении. Неметаллические тугоплавкие соединения и неметаллическая керамика. Екатеринбург: Екатеринбург, 2000. 182 с.
13. Пендин А.А. Избирательная сольватация в трех- и многокомпонентных жидких растворах // *Журнал физической химии*. 1985. Т. 59. № 9. С. 2193–2197.
14. Пендин А.А., Белоусов А.П., Львова Т.И. Расчет структурных характеристик водных растворов 1-1 электролитов по значениям коэффициентов активности // *Журнал физической химии*. 1996. Т. 70. № 5. С. 825–829.
15. Пендин А.А., Казак А.С. Применение концепции сольватационных избытков для изучения взаимного распределения частиц компонентов раствора в системах KCl – NaCl – H<sub>2</sub>O и KNO<sub>3</sub> – NaNO<sub>3</sub> – H<sub>2</sub>O // *Журнал физической химии*. 2010. Т. 84. № 8. С. 1481–1487.
16. Мелик-Гайказян В.И., Емельянова Н.П., Глазунова З.И. О капиллярном механизме упрочнения контакта частица-пузырек при пенной флотации // *Обогащение руд*. 1976. № 1. С. 25–31.

#### References

1. Gol'man AM, Chanturiya VA. *New processes in combined mineral treatment schemes*. Moscow: Nauka; 1989. 210 p. (In Russ.)
2. Solozhenkin PM, Alekseev AN. Innovative processing and hydrometallurgical treatment methods for complex antimony ores and concentrates. Part I. *Journal of Mining Science*. 2010;46(2):203–209.
3. Baranova TV, Solov'eva LS. Ore enrichment process of heavy medium separation. *Zolotodobycha = Gold-mining*. 2008;118. Available from: <https://zolotodb.ru/article/10091> [Accessed September 10th 2019].
4. Xiao Liping, Liao Pinjun, Hu Weibai. Activation of Cu<sup>2+</sup> ions on the flotation of fine antimony oxides. *Journal of Cent.-South Institute of Mining and Metallurgy*. 1985;4:63–75.
5. Orel MA, Rozenfel'd SSh. Enrichment of complex mercury-antimony-fluorite ores. In: *Complex treatment of polymetallic ores*. Moscow: Metallurgiya; 1965. p.12–14. (In Russ.)
6. Vasil'ev VG. Antimony mineralization in Eastern Trans-Baikal region. *Novyi vek – Novye otкрыtiya: materialy Mezhhregional'noi konferentsii, posvyashchenoi 40-letiyu Zabaikal'skogo kompleksnogo nauchno-issledovatel'skogo instituta = New discoveries: Interregional conference dedicated to the 40th anniversary of the Trans-Baikal Complex Research Institute*. Chita: Chita State Technical University; 2001. p.65–76. (In Russ.)



7. Pendin AA, Leont'evskaya PK, Kazak AS. Structural characteristics of the aqueous solutions of monobasic acids and alkalis. *Russian Journal of Physical Chemistry*. 1996;70(11):1965–1970. (In Russ.)

8. Solozhenkin PM, Zinchenko ZI. *Enrichment of antimony ores*. Moscow: Nauka; 1985. 179 p. (In Russ.)

9. Matveeva TN, Gromova NK, Lantsova LB. Effect of Tannin on Compound Collector Adsorption and Stibnite and Arsenopyrite Flotation from Complex Ore. *Journal of Mining Science*. 2017;6:155–162. (In Russ.)

10. Myazin VP. *Flotation enrichment and metallurgy of antimony ores*. Chita: Chita State Technical University; 2015. 156 p. (In Russ.)

11. Levin AA. *Introduction to quantum chemistry of solid bodies: chemical bond and structure of energy bands in tetrahedral semiconductors*. Moscow: Khimiya; 1974. 238 p. (In Russ.)

12. Ivanovskii AL. *Quantum chemistry in materials science. Nonmetallic refractory connections*

*and nonmetallic ceramics*. Ekaterinburg: Ekaterinburg; 2000. 182 p. (In Russ.)

13. Pendin AA. Selective solvation in three- and multicomponent liquid solutions. *Russian Journal of Physical Chemistry*. 1985;59(9):2193–2197. (In Russ.)

14. Pendin AA, Belousov AP, L'vova TI. Structural characteristics calculation for aqueous solutions of 1-1 electrolytes by the activity rate values. *Russian Journal of Physical Chemistry*. 1996;70(5):825–829. (In Russ.)

15. Pendin AA, Kazak AS. The use of the concept of solvation excesses for studying the mutual distribution of solution component particles in the H<sub>2</sub>O – KCl – NaCl and H<sub>2</sub>O – KNO<sub>3</sub> – NaNO<sub>3</sub> systems. *Russian Journal of Physical Chemistry*. 2010;84(8):1481–1487. (In Russ.)

16. Melik-Gaikazyan VI, Emel'yanova NP, Glazunova ZI. On the capillary mechanism of particle-bubble contact strengthening in foam flotation. *Obogashchenie rud = Ore-drying*. 1976;1:25–31. (In Russ.)

#### Критерии авторства / Authorship criteria

Михеев Г.В., Богидаев С.А. написали статью, имеют равные авторские права и несут одинаковую ответственность за плагиат.

Gregory V. Miheev and Sergey A. Bogidayev are the authors of the article, hold equal copyright and bear equal responsibility for plagiarism.

#### Конфликт интересов / Responsibility for plagiarism

Авторы заявляют об отсутствии конфликта интересов.

The authors declare that there is no conflict of interest regarding the publication of this article.

#### Сведения об авторах / Information about the authors



**Михеев Григорий Владимирович**,  
старший научный сотрудник,  
Иркутский научно-исследовательский институт  
благородных и редких металлов и алмазов,  
664025, г. Иркутск, бульвар Гагарина, 38, Россия,  
✉ e-mail: miheev@irgiredmet.ru

**Gregory V. Miheev**,  
Senior Researcher,  
Irkutsk Research Institute of Precious and Rare Metals and Diamonds,  
38, Gagarin Boulevard, Irkutsk, 664025, Russia,  
✉ e-mail: miheev@irgiredmet.ru



**Богидаев Сергей Александрович**,  
научный сотрудник,  
Иркутский научно-исследовательский институт  
благородных и редких металлов и алмазов,  
664025, г. Иркутск, бульвар Гагарина, 38, Россия,  
e-mail: fluorit2001@mail.ru

**Sergey A. Bogidayev**,  
Researcher,  
Irkutsk Research Institute of Precious and Rare Metals and Diamonds,  
38, Gagarin Boulevard, Irkutsk, 664025, Russia,  
e-mail: fluorit2001@mail.ru



Оригинальная статья / Original article  
УДК 691.212

## Факторы, влияющие на эксплуатационную надежность облицовки полов, изготовленных из гранитных пегматитов

© Г.Д. Мальцева<sup>а</sup>, Г.Н. Иванова<sup>б</sup>

<sup>а,б</sup>Иркутский национальный исследовательский технический университет, г. Иркутск, Россия

**Резюме:** Целью данного исследования стало определение причин разрушения полированной облицовочной плитки из гранитных пегматитов, использованной для облицовки полов в закрытом помещении. Материалом для исследования явилась полированная облицовочная плитка из разнозернистой, крупно-гигантозернистой слюдисто-кварц-полевошпатовой породы. При исследовании использован метод микроскопический в проходящем свете (микроскоп OLYMPUS BX51 и микроскоп стереоскопический лабораторный Steindorff 170-BD-LED-E). Проведена оценка природных особенностей гранитных пегматитов, влияющих на устойчивость облицовочной плитки при эксплуатации. В результате определены минеральный состав и структурно-текстурные особенности гранитных пегматитов, процентное содержание минералов, их размер и взаимоотношения. Установлено, что на устойчивость исследуемой плитки влияет свойство кристаллических сред, связанное с внутренним строением минералов. Исследуемая облицовочная плитка состоит из плагиоклаза, микроклина, кварца, мусковита, биотита, граната. Структура – разнозернистая, от мелкозернистой до гигантозернистой (кристаллически зернистой). Наблюдается перемежаемость участков мелкозернистого строения, среднезернистого и крупно-гигантозернистого строения. Минералы в основном относятся к твердым (их твердость – 6–7 по шкале Мооса), исключение составляют слюды (твердость которых составляет 2–3 по шкале Мооса). Два из установленных минералов – мусковит и плагиоклаз – обладают весьма совершенной и совершенной спайностью соответственно. В основе проявления спайности лежит анизотропия сил сцепления закономерно расположенных структурных единиц в кристаллических решетках минералов. Весьма совершенная спайность слюд является плоскостью скольжения, что отрицательно влияет на устойчивость облицовочной плитки и приводит к растрескиванию и последующему скалыванию и выкрашиванию по спайности. Плагиоклаз, имеющий совершенную спайность в двух направлениях, в случае крупнокристаллического строения при приложении вертикальной нагрузки раскалывается по спайности в двух направлениях. Таким образом, можно сделать вывод о том, что причиной разрушения облицовочной плитки, представленной неравномернозернистой, крупно-гигантозернистой породой слюдисто-кварц-полевошпатового состава, является кристаллическое строение мусковита и плагиоклаза, приводящее к разрушению минералов по спайности.

**Ключевые слова:** облицовочные материалы, минералы, спайность, твердость, структура и текстура, пегматит, кристаллическая решетка

**Информация о статье:** Дата поступления 9 апреля 2019 г.; дата принятия к печати 9 августа 2019 г.; дата онлайн-размещения 30 сентября 2019 г.

**Для цитирования:** Мальцева Г.Д., Иванова Г.Н. Факторы, влияющие на эксплуатационную надежность облицовки полов, изготовленных из гранитных пегматитов. *Науки о Земле и недропользование*. 2019. Т. 42. № 3. С. 366–374.

## Factors affecting the serviceability of granite pegmatite floor facing tiles

© Galina D. Maltseva<sup>а</sup>, Galina N. Ivanova<sup>б</sup>

<sup>а,б</sup>Irkutsk National Research Technical University, Irkutsk, Russia

**Abstract:** The aim of the research work has been to define the factors causing the destruction of polished granite pegmatite tiles used for indoor flooring. Facing tiles made of various-size-grain and large-to-giant-grain rocks (mica-quartz-feldspar composition) have been studied using a transmitted-light microscopy method (OLYMPUS BX51 microscope and Steindorff stereoscopic laboratory microscope, 170-BD-LED-E model). The natural features of the granite pegmatite that affect the endurance of the facing tiles have been studied, i.e. the mineral composition and structural-textural properties of the granite pegmatite tiles, as well as the mineral percentage, the grain size and interrelationships have been defined. It has been found that that the tile endurance depends on a crystalline-media property connected with the minerals' internal structure. The studied tiles consist of plagioclase, microcline, quartz,



muscovite, biotite, and garnet. The structure is heterogeneous, varying from fine-grain to giant-grain (crystalline-grain), with alternating fine-grain, medium-grain and large-to-giant-grain structure areas. The minerals are mainly hard (6–7 by the Mohs scale of hardness), except for the mica (2–3). The muscovite and plagioclase have perfect and perfect cleavage, respectively. The cleavage is associated with the anisotropic cohesive forces acting among the regularly arranged structural units in the minerals' lattice. The mica's cleavage is a slip plane, which affects the endurance of the facing tile and causes cleavage fracture and subsequent chipping and breakdown. The coarse-crystalline plagioclase has perfect cleavage in two directions, i.e. under vertical load it splits in two directions on the cleavage. Thus, a conclusion can be made that the muscovite's and plagioclase' crystalline structure causes cleavage fracture of the facing tiles and their further destruction.

**Keywords:** facing materials, minerals, cleavage, hardness, structure and texture, pegmatite, crystal lattice

**Information about the article:** Received April 9, 2019; accepted for publication August 9, 2019; available online September 30, 2019.

**For citation:** Maltseva G.D., Ivanova G.N. Factors affecting the serviceability of granite pegmatite floor facing tiles. *Earth Sciences and Subsoil Use*. 2019;42(3):366–374. (In Russ.)

### Введение

Наиболее прочными облицовочными материалами из природного камня являются магматические горные породы, имеющие твердость 6–7 по шкале Мооса, в частности граниты. Они являются не только прочными согласно технологической классификации облицовочных камней, но весьма долговечными и долговечными по классификации облицовочного камня по долговечности. В условиях внутренней облицовки долговечность гранита может оказаться практически неограниченной. При этом гранит должен быть равномернозернистым, мелко-среднезернистым. Порода, близкая по минеральному составу к граниту, но отличающаяся по строению – это гранитные пегматиты, характеризующиеся крупно-гигантозернистой, неравномернозернистой структурой. При облицовке полов естественными материалами из породы, имеющей крупно-гигантозернистое строение, возникает проблема, обусловленная разрушением плитки в процессе эксплуатации, что приводит к большим финансовым потерям. Обусловлены эти проблемы игнорированием природных особенностей данных материалов и нарушением правил устройства полов [1–3].

Горные породы, используемые для изготовления изделий для покрытий полов общественных и промышленных

зданий, должны быть стойкими к механическим истирающим и ударным воздействиям, что нормируется соответствующими документами. Перечень технических требований, предъявляемых к облицовке, достаточно велик<sup>1,2</sup> [4]. К ним относятся:

- механические требования (несущая способность, ударопрочность и износостойкость, упругость, обеспечение безопасного передвижения по ним и т. д.);
- теплотехнические требования (тепло- и морозостойкость, теплопроводящая и теплопоглощающая способность и т. д.);
- акустические требования (поглощение звука шагов и шума, который производит поток воздуха);
- гидротехнические требования (гидроизоляционная способность, способность удерживать испарения и т. д.);
- светотехнические требования (светостойкость, способность поглощать солнечный свет и т. д.);
- устойчивость к химикатам;
- требования, связанные с электричеством (отсутствие электропроводимости, неспособность к накоплению электростатики);
- санитарно-гигиенические требования (возможность чистки и обеззараживания);

<sup>1</sup> ГОСТ 9480-2012. Плиты облицовочные из природного камня. Технические условия. Введ. 01.07.2013.

<sup>2</sup> Айрапетов Г.А., Безродный О.К., Жолобов А.Л. [и др.]. Строительные материалы: учеб.-справ. пособие / ред. Г.В. Несветаева. Ростов н/Д.: Феникс, 2005. 621 с.



- требования по безопасности (облицовка не должна быть скользкой);
- радиологические требования (отсутствие радиоактивности, устойчивость к радиоактивному излучению);
- требования, связанные с прочностью и долговечностью (антикоррозийная стойкость, сопротивление старению);
- эстетические требования (равномерная окраска, цвет и т. д.);
- противопожарные требования.

### **Материалы и методы исследования**

Материалом для исследования явилась полированная облицовочная плитка из разнозернистой, крупно-гигантозернистой слюдисто-кварц-полевошпатовой породы. При исследовании использован метод микроскопический в проходящем свете (микроскоп OLYMPUS BX51 и микроскоп стереоскопический лабораторный Steindorff 170-BD-LED-E). Проведена оценка природных особенностей гранитных пегматитов, влияющих на устойчивость облицовочной плитки при эксплуатации.

Физико-механические и декоративные показатели составляющих горную породу минералов (твердость, цвет, блеск, степень прозрачности, спайность и др.) и их пространственное расположение в породе оказывают влияние на ее строительные качества.

Важным фактором декоративности камня является блеск слагающих его минералов. Он характеризует также способность горной породы принимать зеркальную фактуру, в которой полностью выявляются рисунок и все нюансы расцветки [5–7].

### **Результаты исследования**

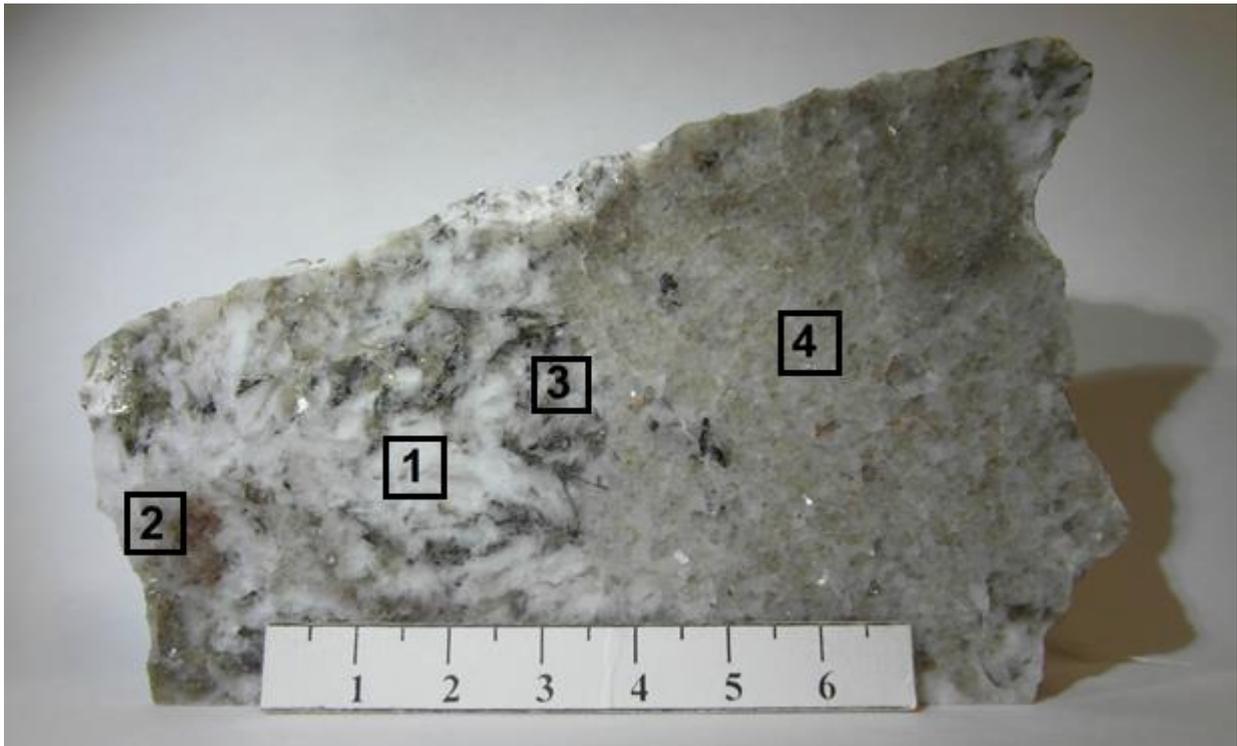
Исследованная напольная плитка изготовлена из лейкократовой неравномернозернистой, крупно-гигантозернистой породы, являющейся, безусловно,

декоративным облицовочным материалом. Минеральный состав в процентах: кварц – 40, плагиоклаз – 50, мусковит – 9, биотит, гранат, калишпат – примерно 1. Все минералы характеризуются различными свойствами и имеют разный размер зерен и кристаллов. Кварц имеет твердость 7, и его зерна имеют размер от первых миллиметров до 1,5–4 см. Аналогичный размер имеют зерна и кристаллы плагиоклаза. Плагиоклаз замещает калиевый полевой шпат, и последнего практически не осталось. Твердость полевых шпатов – 6–6,5. Размер мусковита – от 1–2 мм (мелкочешуйчатый) до 2–4 см. Мусковит беспорядочно рассеян по всей массе пегматита и частично замещается биотитом. Твердость слюд – 2–3. Зерна граната размером 1–2 мм имеют округлую форму, цвет – желтый, твердость – 6,5–7,5. Таким образом, облицовочный материал представлен преимущественно твердыми минералами с твердостью 6–7, и только слюды характеризуются более низкой относительно остальных минералов твердостью. По минеральному составу и структурно-текстурным особенностям порода относится к магматогенным гранитным пегматитам формации слюдоносных пегматитов<sup>3</sup>, которые изучались многими исследователями [8–15].

Неравномернозернистая, крупно-гигантозернистая структура породы обуславливает ее неоднородное строение, то есть чередуются участки с мелкозернистым, среднезернистым и крупнозернистым строением. Естественно, участки с мелкозернистым строением будут более устойчивыми к внешним воздействиям (рис. 1).

Менее устойчивые участки облицовочной плитки – те, которые имеют неравномернозернистое (кристаллическое) крупно-гигантозернистое строение и состоят из нескольких минералов с различными свойствами (рис. 2).

<sup>3</sup> Семинский Ж.В., Мальцева Г.Д., Семейкин И.Н., Яхно М.В. Геология и месторождения полезных ископаемых: учеб. пособие для вузов / под общ. ред. Ж.В. Семинского. М.: ЮРАЙТ, 2018. 347 с.



**Рис. 1. Неоднородное строение облицовочной плитки:**

1–3 – среднекристаллическое строение: 1 – плагиоклаз (белый), 2 – кварц (серый),  
3 – слюды (серо-черные); 4 – мелко-среднезернистая масса из зерен кварца и плагиоклаза  
с редкими зернами граната размером 1–2 мм (желтые) и мелкими чешуйками мусковита (аплит)

**Fig. 1. Heterogeneous structure of facing tiles:**

1–3 medium-crystalline structure: 1 – plagioclase (white), 2 – quartz (gray),  
3 – mica (gray-black), 4 – fine-medium-grained mass of quartz grains and plagioclase  
with rare grains of garnet 1–2 mm in size (yellow) and fine muscovite scales (aplite)



**Рис. 2. Крупно-гигантозернистое строение облицовочной плитки**

Крупные кристаллы кварца (3) и белого плагиоклаза (1), замещающего розовый калишпат (2)

**Fig. 2. Coarse-structure pegmatite tiles**

Large crystals of quartz (3) and white plagioclase (1) as a substituent of pink K-feldspar (2)



В составе горной породы имеются минералы, обладающие спайностью. Спайность минералов – это способность минералов раскалываться параллельно плоским сеткам пространственной решетки с образованием разных поверхностей скола. Раскол проходит между теми плоскими сетками, которые характеризуются самыми слабыми силами связи. Такие плоскости обычно густо заселены атомами, но отстоят друг от друга на большем расстоянии. Лучше всего спайность проявляется на крупных кристаллах. Плоскости спайности отличаются ровностью и блеском, поэтому при обработке скалыванием порода приобретает поверхностный искристый блеск, а при распиловке спайность срезается под различными углами. Наличие спайности несколько нарушает направленность разрушения, поскольку под действием удара камень скалывается не только в требуемом направлении, но и по линии наименьшего сопротивления, определяемой плоскостями спайности<sup>4,5</sup> [16–19]. В этом случае поверхность обработки приобретает некоторую неровность, характерную для пород, сложенных из минералов с ярко выраженной спайностью, то есть у изделия образуется своеобразная шероховатая поверхность. В пиленом камне спайность разных минералов будет проявляться различным образом. В срезе спайность наблюдается в виде серии трещин, пересекающих минерал.

Спайность проявляется по-разному в зависимости от направления среза минерала плоскостью шлифа. Если срез минерала прошел перпендикулярно плоскостям спайности, трещины имеют вид тонких четких линий. С увеличением наклона среза относительно плоскостей спайности трещины становятся все более широкими, расплывающимися, пока совершенно не исчезнут. Так, слюды в разрезах, перпендикулярных плоскостям спайности, имеют тонкие четкие трещины; в разрезах, проходящих близкопараллельно или параллельно плоскостям спайности, трещины не обнаруживаются.

В рассматриваемой плитке минералы, обладающие спайностью – это слюды и плагиоклаз. Слюды (мусковит и биотит) относятся к листовым силикатам и характеризуются весьма совершенной спайностью в одном направлении и несовершенной в двух направлениях. Присутствие слюд в составе горной породы придает сколу камня характерный блеск и улучшает его декоративность, но при этом снижается стойкость. У мусковита, как и у всех слоистых силикатов и алюмосиликатов, весьма совершенная спайность по пинакоиду, так как пакеты в их структурах связаны друг с другом слабо (рис. 3).

Весьма совершенная спайность в одном направлении позволяет расщепить кристалл только в этом направлении и является плоскостью скольжения, что



**Рис. 3. Спайность по пинакоиду**  
**Fig. 3. Cleavage on pinacoid**

<sup>4</sup> Бетехтин А.Г. Курс минералогии: учеб. пособие. М.: КДУ, 2007. 720 с.

<sup>5</sup> Булах А.Г., Кривовичев В.Г., Золотарев А.А. Общая минералогия: учебник. 4-е изд., перераб. и доп. М.: Академия, 2008. 416 с.



отрицательно влияет на устойчивость облицовочной плитки. Спайные пластинки у слюд (мусковита, биотита) упругие; отогнутые по спайности, они притягиваются назад из-за связей, возбуждаемых в них межпакетными катионами калия. У слюд за счет межпакетного катиона  $K^+$  твердость составляет 2–3 (рис. 4).

Порода, из которой изготовлена облицовочная плитка, трещиноватая. Трещинки длиной от 2–3 мм до 2–3 см имеют различное направление и совпадают в основном со спайностью слюд, если кристалл срезается под углом к полированной поверхности. Поскольку чешуйки слюд различно ориентированы в породе, соответственно, они при распиловке породы срезаются под разными углами. Различный угол среза слюд обуславливает либо их выкрашивание (выбоины) при остром угле встречи, либо переличатость слюд по спайности при угле среза, близком к расположению чешуйки. В первом случае места выкрашивания слюды создают в полированной плитке шероховатость и являются путями проникновения воды и, соответственно, последующих гипергенных преобразова-

ний, а во втором придают большую декоративность породе.

Другой минерал в исследуемой плитке, обладающий спайностью – это плагиоклаз, относящийся к группе каркасных силикатов и обладающий совершенной спайностью в двух направлениях. Крупные кристаллы плагиоклаза при приложении нагрузки раскрашиваются по двум пинакоидам, то есть получаются спайные выколки (рис. 5).

Способствовать раскрашиванию плагиоклаза может тепловое расширение минералов, различное у кварца и полевых шпатов. Коэффициент теплового расширения кварца в два раза выше, чем у плагиоклаза. Вблизи источников тепла или при нагреве солнечными лучами, расширяясь и сжимаясь в разной степени, зерна или кристаллы минералов создают микронапряжения в породе, которые расшатывают между частицами связи, возникшие при кристаллизации породы. В результате кристаллическая порода, сохраняя свой минеральный и химический состав, рассыпается на отдельные зерна по спайности.

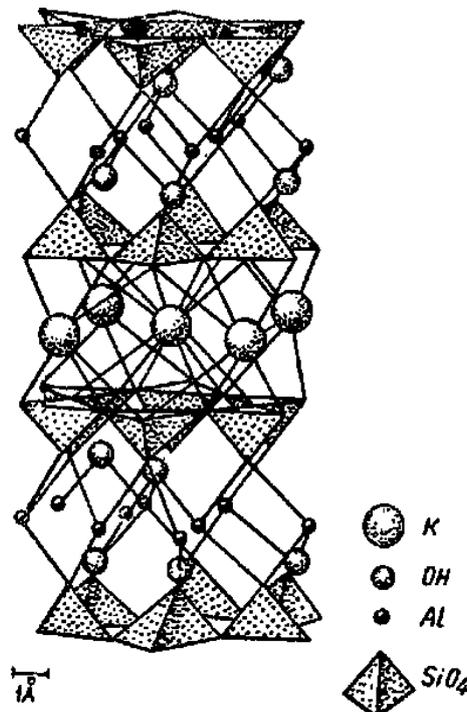
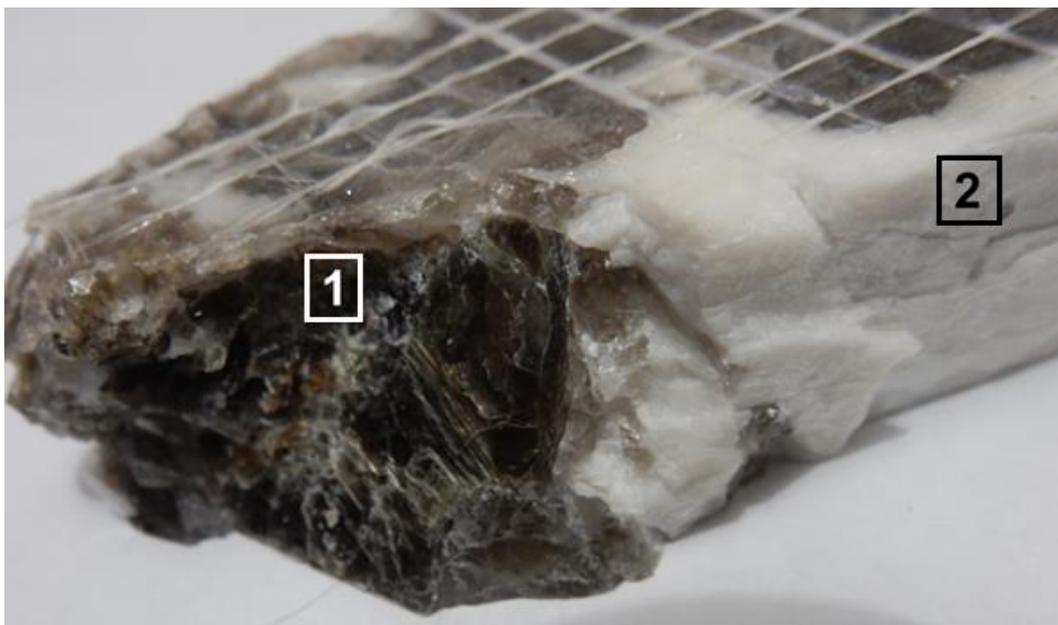


Рис. 4. Последовательность слоев в структуре мусковита  
Fig. 4. Sequence of layers in the muscovite structure



**Рис. 5. Разрушение облицовочной плитки по спайности мусковита (1) в одном направлении и плагиоклаза в двух направлениях (2)**  
**Fig. 5. Cleavage fracturing of tiles: muscovite, in one direction (1), and plagioclase, in two directions (2)**

Отдельно следует отметить и технологию приклеивания плитки. Плитка была приклеена через определенное расстояние. Высота удерживающей массы – 2–3 мм, что привело к образованию пустот под плиткой. При приложении нагрузки к плитке (особенно при большом пешеходопотоке), под которой имеются пустоты, происходит растрескивание по микротрещинкам и по спайности минералов.

### Заключение

Оценивая исследуемую полиминеральную породу с точки зрения эксплуатации в качестве покрытия для полов, следует отметить:

– пегматит будет разрушаться быстрее из-за неустойчивого рыхлого разнозернисто-разнокристаллического сложения;

– пегматит будет разрушаться быстрее в части крупнокристаллического полиминерального агрегата;

– раскалывание происходит по спайности слюд в одном направлении (скольжение) и по спайности плагиоклаза в двух направлениях (выколки);

– пегматит мелкотрещиноватый, интенсивно будет подвергаться физическому и химическому изменению при эксплуатации.

Таким образом, можно сделать вывод о том, что облицовочную плитку, имеющую крупно-гигантозернистое строение, при котором минералы характеризуются весьма совершенной и совершенной спайностью, использовать для покрытия полов не рекомендуется.

### Библиографический список

1. Сычёв Ю.И. Камень в облицовке: ошибки, которых можно избежать // Камень вокруг нас. 1999. № 6. [Электронный ресурс]. URL: <http://kilouma.ru/safia/kamene-vokrug-nas/main.html> (19.05.2019).

2. Шеков В.А. Современные требования к продукции из природного камня // Камень и

бизнес. 2003. № 3. [Электронный ресурс]. URL: <https://stonebusiness.ru/modules.php?op=mod-load&name=News&file=article&sid=74> (19.05.2019).

3. Бурмистров Г.Н. Материалы для облицовки зданий. М.: Стройиздат, 1988. 175 с.

4. Классификация облицовочных материалов по различным параметрам // RusArticles.



[Электронный ресурс]. URL: <http://www.rusarticles.com/tehnologii-remonta-statya/klassifikaciya-oblicovochnyx-materialov-po-razlichnym-parametram-4480333.html> (19.05.2019).

5. Маркова Л.В., Иванова Г.Н. Иризирующие полевые шпаты Южного Прибайкалья // Проблемы освоения минеральной базы Восточной Сибири: сб. науч. трудов. Иркутск: Изд-во ИрГТУ, 2014. С. 154–158.

6. Сычев Ю.И., Глазова Г.П. Методика оценки декоративности облицовочного камня // Облицовочный камень Карело-Кольского региона / ред. Г.И. Горбунов, О.Н. Крашенинников. Л.: Наука, 1983. С. 80–97.

7. Зискинд М.С. Декоративно-облицовочные камни. Л.: Недра, 1989. 255 с.

8. Гинзбург А.И., Тимофеев И.Н., Фельдман Л.Г. Основы геологии гранитных пегматитов / ред. Б.М. Шмакин. М.: Недра, 1979. 296 с.

9. Киевленко Е.Я., Чупров В.И., Драмшева Е.Е. Декоративные коллекционные минералы. М.: Недра, 1987. 223 с.

10. Лебединский В.И. В удивительном мире камня. Изд. 3-е, перераб и доп. М.: Недра, 1985. 224 с.

11. Макрыгина В.А., Макагон В.М., Загорский В.Е., Шмакин Б.М. Гранитные пегматиты: монография. В 5 т. Т. 1. Слюданосные пегматиты /

отв. ред. В.Н. Собаченко, Б.М. Шмакин. Новосибирск: Наука, 1990. 232 с.

12. Петров В.П. Рассказы о поделочном камне. М.: Наука, 1982. 104 с.

13. Тальгамер Б.Л., Федорко В.П., Филонюк В.А., Драбчук Ю.В., Мальцева Г.Д., Рубцов Л.Г. [и др.]. Минерально-сырьевая база и перспективы развития горнодобывающей промышленности Иркутской области. Иркутск: Изд-во ИрГТУ, 2002. 91 с.

14. Тальгамер Б.Л., Федорко В.П., Филонюк В.А., Драбчук Ю.В., Мальцева Г.Д., Рубцов Л.Г. Перспективы развития горнодобывающей промышленности Иркутской области // Вестник Иркутского государственного технического университета. 2003. № 2 (14). С. 11–17.

15. Шмакин Б.М. Мусковитовые и редкометалльно-мусковитовые пегматиты. Новосибирск: Наука, 1976. 367 с.

16. Херлбат К., Клейн К. Минералогия по системе Дэна. М.: Недра, 1982. 728 с.

17. Либау Ф. Структурная химия силикатов / пер. с англ. М.: Мир, 1988. 412 с.

18. Пушаровский Д.Ю. Структурная минералогия силикатов и их синтетических аналогов. М.: Недра, 1986. 160 с.

19. Пушаровский Д.Ю. Структурная минералогия силикатов // Соросовский образовательный журнал. 1998. Т. 4. № 3. С. 83–91.

## References

1. Sychev Yul. Facing stone: mistakes to avoid. *Kamen' vokrug nas = Stone Around Us*. 1999;6. Available from: <http://kilouma.ru/safia/kamene-vokrug-nas/main.html> [Accessed May 19th 2019].

2. Shekov VA. Present requirements for natural stone products. *Stone and Business*. 2003;3. Available from: <https://stonebusiness.ru/modules.php?op=modload&name=News&file=article&sid=74> [Accessed May 19th 2019].

3. Burmistrov GH. *Materials in facing buildings*. Moscow: Stroizdat; 1988. 175 p. (In Russ.)

4. Classification of facing materials by various parameters. *RusArticles*. Available from: <http://www.rusarticles.com/tehnologii-remonta-statya/klassifikaciya-oblicovochnyx-materialov-po-razlichnym-parametram-4480333.html> [Accessed May 19th 2019].

5. Markova LV, Ivanova GN. Iridescent feldspar of the southern Baikal region. In: *Problemy osvoeniya mineral'noi bazy Vostochnoi Sibiri: sbornik nauchnykh trudov = Development of mineral base of Eastern Siberia: collected articles*. Irkutsk: Irkutsk State Technical University; 2014. p.154–158. (In Russ.)

6. Sychev Yul, Glazova GP. Methodology for assessing the decorativeness of facing stone. In: Gorbunov GI, Krasheninnikov ON (eds.). *Facing*

*stone of the Karelian-Kola region*. Leningrad: Nauka; 1983. p.80–97. (In Russ.)

7. Ziskind MS. *Decorative facing stones*. Leningrad: Nedra; 1989. 255 p. (In Russ.)

8. Ginzburg AI, Timofeev IN, Fel'dman LG. *Fundamentals of Granite Pegmatite Geology*. Moscow: Nedra; 1979. 296 p. (In Russ.)

9. Kievlenko EYa, Chuprov VI, Dramsheva EE. *Decorative collection minerals*. Moscow: Nedra; 1987. 223 p. (In Russ.)

10. Lebedinskii VI. *In the wonderful world of stone*. Moscow: Nedra; 1985. 224 p. (In Russ.)

11. Makrygina VA, Makagon VM, Zagorskii VE, Shmakin BM. *Granitic pegmatites*. In 5 vol. Vol. 1. *Mica-bearing pegmatites*. Novosibirsk: Nauka; 1990. 232 p. (In Russ.)

12. Petrov VP. *Tales of ornamental stone*. Moscow: Nauka; 1982. 104 p. (In Russ.)

13. Tal'gamer BL, Fedorko VP, Filonyuk VA, Drabchuk YuV, Maltseva GD, Rubtsov LG, et al. *Mineral resource base and prospects for the mining industry development in the Irkutsk region*. Irkutsk: Irkutsk State Technical University; 2002. 91 p. (In Russ.)

14. Tal'gamer BL, Fedorko VP, Filonyuk VA, Drabchuk YuV, Maltseva GD, Rubtsov LG. Prospects for the development of the mining industry of the Irkutsk region. *Proceedings of Irkutsk State Technical University*. 2003;2(14):11–17. (In Russ.)



15. Shmakin B.M. *Muscovite and rare-metal muscovite pegmatites*. Novosibirsk: Nauka; 1976. 367 p. (In Russ.)

16. Kherlbat K, Klein K. *Mineralogy by the Dan system*. Moscow: Nedra; 1982. 728 p. (In Russ.)

17. Libau F. *Structural chemistry of silicates*. Moscow: Mir; 1988. 412 p. (In Russ.)

18. Pushcharovskii DYu. *Structural mineralogy of silicates and their synthetic analogues*. Moscow: Nedra; 1986. 160 p. (In Russ.)

19. Pushcharovskii DYu. Structural mineralogy of silicates. *Sorosovskii obrazovatel'nyi zhurnal = The Soros Educational Journal*. 1998;4(3):83–91. (In Russ.)

### Критерии авторства / Authorship criteria

Мальцева Г.Д., Иванова Г.Н. написали статью, имеют равные авторские права и несут одинаковую ответственность за плагиат.

Galina D. Maltseva and Galina N. Ivanova are the authors of the article, hold equal copyright and bear equal responsibility for plagiarism.

### Конфликт интересов / Responsibility for plagiarism

Авторы заявляют об отсутствии конфликта интересов.

The authors declare that there is no conflict of interests regarding the publication of this article.

### Сведения об авторах / Information about the authors



**Мальцева Галина Дмитриевна,**

кандидат геолого-минералогических наук,  
доцент кафедры прикладной геологии, геофизики  
и геоинформационных систем,  
Институт недропользования,  
Иркутский национальный исследовательский технический университет,  
664074, г. Иркутск, ул. Лермонтова, 83, Россия,  
✉ e-mail: dis@istu.edu

**Galina D. Maltseva,**

Cand. Sci. (Geol. & Mineral.),  
Associate Professor, Department of Applied Geology,  
Geophysics and Geoinformation Systems,  
Institute of Subsoil Use,  
Irkutsk National Research Technical University,  
83, Lermontov St., Irkutsk, 664074, Russia,  
✉ e-mail: dis@istu.edu



**Иванова Галина Николаевна,**

доцент кафедры ювелирного дизайна и технологий,  
Институт недропользования,  
Иркутский национальный исследовательский технический университет,  
664074, г. Иркутск, ул. Лермонтова, 83, Россия,  
e-mail: galu@istu.irk.ru

**Galina N. Ivanova,**

Associate Professor, Department of Jewelry Design and Technologies,  
Institute of Subsoil Use,  
Irkutsk National Research Technical University,  
83, Lermontov St., Irkutsk, 664074, Russia,  
e-mail: galu@istu.irk.ru



## Уважаемые авторы!

Изложенные ниже требования к оформлению научных статей разработаны редакцией журнала и призваны помочь Вам предоставить все необходимые для публикации сведения и избежать самых распространенных ошибок.

1. В журнале публикуются статьи по следующей тематике:

- геологическое строение рудных, нерудных, в том числе горючих, месторождений полезных ископаемых (вмещающие комплексы пород, связь оруденения с магматизмом, метаморфизмом, осадконакоплением);
- тектоника месторождений, рудных узлов, районов;
- минералогия и геохимия месторождений полезных ископаемых;
- генетические проблемы формирования месторождений полезных ископаемых;
- минерагения (металлогения): рудные зоны, районы, пояса, металлогенические карты;
- методы и методики поисков и разведки месторождений полезных ископаемых;
- физико-геологические модели месторождений полезных ископаемых;
- геоинформационные технологии в науках о Земле;
- технологии и техника буровзрывных работ;
- технологии и техника разработки месторождений полезных ископаемых;
- технологии и техника обогащения и переработки минерального сырья;
- геммология и технология художественной обработки минералов и горных пород;
- гидрогеология и инженерная геология;
- маркшейдерское обеспечение горных работ;
- безопасность жизнедеятельности в горно-геологической отрасли;
- геоэкология;

а также другие работы в рамках научного направления 25.00.00.

Приоритетными для публикации являются статьи в области междисциплинарных и мультидисциплинарных исследований, а также результаты работ с использованием цифровых технологий.

2. Статьи принимаются на русском, английском и китайском языках от авторов, работающих в российских и иностранных вузах, академических и отраслевых научно-исследовательских институтах, а также производственных горно-геологических организациях.

3. К статье прилагаются:

- электронные версии (скан): авторское заявление, заполненное и подписанное всеми соавторами статьи; авторский договор;
- акт экспертного заключения о возможности открытой публикации материалов;
- сведения обо всех авторах на русском и английском языках: название вуза, организации, учреждения, должность и структурное подразделение, наличие ученой степени, ученого звания, контактные рабочий или мобильный телефоны (для связи), почтовый и электронный адреса (просим Вас указать реальные и работающие адреса электронной почты индивидуально для каждого соавтора статьи);
- цветные портретные фотографии авторов на светлом фоне (деловой стиль) в хорошем качестве в электронной версии в формате \*.JPG, формат фото – квадрат;
- по желанию автора в статье могут быть указаны его профили в системах цитирования и другие сведения (профиль в РИНЦ, профиль в ORCID, профиль в Scopus, профили 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!*



4. Статьи принимаются ответственным секретарем в электронном виде в формате Microsoft Word для Windows по электронной почте [geo\\_info@istu.edu](mailto:geo_info@istu.edu). Шрифт – Times New Roman, размер шрифта – 12 (строки через 1,0 интервал), перенос слов – автоматический. Параметры страницы: отступы сверху, снизу, слева и справа – 2,5 см, абзацный отступ – 1 см, ориентация страницы – книжная.

5. Объем текста – от 10000 знаков, включая пробелы, иллюстрационный материал – до 5–6 рисунков.

6. Статьи должны быть структурированы и выполнены по международному стандарту IMRAD. В структуру статьи должны входить: индекс УДК, название статьи, фамилия, имя, отчество авторов, название учреждения, где выполнена работа, аннотация и ключевые слова на русском и английском языках, введение (краткое), 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).

7. Рекомендуемая длина названия научной статьи составляет не более 80–100 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 ее главную идею, и коротким настолько, чтобы ни одно слово нельзя было выбросить без потери смысла.

8. Аннотация по объему – до 200–250 слов, содержит следующие разделы: цель, методы, предмет, объект исследования, результаты, выводы. Аннотация должна отражать содержание статьи, поскольку для большинства читателей она будет главным источником информации о данном исследовании. Не ссылайтесь в аннотации на таблицы или рисунки, поскольку аннотации также публикуются отдельно от статьи. Не разрешены и ссылки на использованную литературу. 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. Не повторяйте в аннотации фразы из текста статьи и ее заголовка.

Ключевые слова должны отражать суть исследования, способствовать работе поисковых систем, по количеству не превышать 10 единиц, словосочетания – не более 3 единиц.

9. Формулы в тексте должны быть набраны в специальном редакторе формул Microsoft Equation Editor. Все экспликации элементов формул необходимо также выполнять в редакторе формул.

10. 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. Дополнительно должны приводиться переводы названий таблиц на английский язык.

11. Графические материалы к статье (рисунки и фотографии) представляются в минимальном количестве (не более 5–6 рисунков). Должны быть выполнены чисто и аккуратно в соответствии с требованиями к геологической графике. Масштаб их должен быть пригодным для тиражирования, а размер – не более 160×245 мм. Графические материалы должны допускать перемещение в тексте и возможность изменения размеров. Каждый рисунок должен сопровождаться надписями в содержательной части и подрисуночной подписью на русском и английском языках, в которой дается объяснение всех его элементов.

12. 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).

13. Список литературы составляется в двух вариантах. В библиографическом описании статьи необходимо указывать всех авторов, не сокращая их до трех-четырех.

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 библиографическом списке и references можно посмотреть на нашем сайте в разделе «Требования к статьям».

14. Авторы статей должны придерживаться обязанностей, предусмотренных «Редакционной политикой журнала».

15. Редакция оставляет за собой право отклонять статьи, не отвечающие указанным требованиям. Поступающие в редакцию материалы возврату не подлежат.

16. Редакция оставляет за собой право на научное и литературное редактирование статей с последующим согласованием с авторами.

17. Представленные статьи проходят проверку на наличие заимствований.

18. Журнал выпускается с периодичностью 4 номера в год. Приобрести журнал можно по обращению в редакцию.

**Внимание! Публикация статей является бесплатной. Стоимость печатного авторского экземпляра журнала – 500 рублей.**

**Статьи, опубликованные в журнале «Науки о Земле и недропользование», реферируются и рецензируются.**

*Мы приглашаем Вас к участию в нашем журнале в качестве авторов, рекламодателей и читателей.*

По вопросам публикации обращаться по адресу: 664074, Россия, г. Иркутск, ул. Лермонтова, 83, Иркутский национальный исследовательский технический университет, редколлегия, аудитория Е-317.

Главный редактор Лобацкая Раиса Моисеевна, тел.: 8 (3952) 405115, e-mail: lobatskaya@gmail.com

Заместитель главного редактора Аузина Лариса Ивановна, e-mail: lauzina@mail.ru

Заместитель главного редактора Красноштанов Сергей Юрьевич, тел.: 8 (3952) 405101, e-mail: geo\_info@istu.edu

Статьи необходимо направлять ответственному секретарю Храмовских Виталию Александровичу, тел.: 8 (3952) 405069, e-mail: geo\_info@istu.edu, аудитория Ж-04.



Образец оформления статьи

УДК 549.09

## Минералого-технологические типы руд Томинского месторождения меди (Южный Урал)

© Е.М. Курчевская<sup>а</sup>, М.В. Яхно<sup>б</sup>, А.Е. Сенченко<sup>с</sup>

<sup>а,с</sup>НИИПИ «Технологии обогащения минерального сырья», г. Иркутск, Россия

<sup>б</sup>Иркутский национальный исследовательский технический университет, г. Иркутск, Россия

**Резюме:** Цель. Цель данной статьи заключается в исследовании технологических типов руд Томинского месторождения меди, изучении минерального состава вмещающих пород и руд каждого из трех типов, выявлении минералогических и структурно-текстурных особенностей руд, выявлении взаимосвязи изменения рудной минерализации и степени метаморфизма для каждого типа руд. **Методы.** Рудные тела Томинского медно-порфирового месторождения, залегающие в диоритах и кварцевых диоритах, представляют собой прожилковые и прожилково-вкрапленные скопления в зонах дробления. На месторождении широко развиты метасоматиты кварц-серицитовой формации. Изучение типов руд проводилось с использованием микроскопов. **Результаты.** В результате выделено три геолого-технологических типа руд в пределах Томинского месторождения. Первый тип представлен первичными сульфидными рудами, которые наблюдаются в среднем ниже глубины 50–55 м. По составу это хлорит-мусковит-кварцевые метасоматиты. Вмещающие породы представлены серицитизированными, хлоритизированными и карбонатизированными диоритами. В составе руд преобладают халькопирит и пирит. Практически вся медь содержится в халькопирите. Второй тип – это рудные зоны вторичного сульфидного обогащения. Этот тип сложен первичными и вторичными сульфидами меди. Все породы аргиллизированные и представлены метасоматитами различного состава. Все виды пород несут в себе рудную минерализацию. К третьему типу относятся окисленные руды, которые образуют зону окисления месторождения. Они делятся на три подтипа: глинистые, глинисто-щебнистые и щебнистые руды. Глинистые руды залегают в самых верхних частях коры выветривания, глинисто-щебнистые руды слагают центральную ее часть, а руды в щебнистых образованиях отмечены в нижних горизонтах. Представлено петрографическое описание каждого из типов. Выявлены минералогические и структурно-текстурные особенности руд. В результате изучения петрографического состава каждого типа руд установлена различная степень метаморфизма и вследствие этого – изменение рудной минерализации. **Выводы.** Прослеживается влияние метасоматических процессов, изменивших строение и минеральный состав руд. Для первого типа руды характерно наличие первичных пород – диоритов с насыщенной сульфидной вкрапленностью и с незначительными метасоматическими изменениями. В зоне вторичного обогащения породы претерпели интенсивное метасоматическое изменение. Породы этой зоны насыщены гидроксидами железа. Для зоны интенсивного выветривания характерны глинистые и хлоритизированные породы. Рудная минерализация представлена исключительно окисленными минералами. Сульфиды единичны. Различия в минеральном составе трех типов руд влияют на выбор способов переработки руды в пределах Томинского месторождения.

**Ключевые слова:** Томинское месторождение, медно-порфировое оруденение, метаморфизм, технологические типы руд

**Благодарности:**

## Mineralogical and technological types of Tominskoye deposit copper ores (Southern Ural)

© Elena M. Kurchevskaya<sup>а</sup>, Marina V. Yakhno<sup>б</sup>, Arkady Y. Senchenko<sup>с</sup>

<sup>а,с</sup>NIPI TOMS (Scientific Research and Design Institute “Technologies of Minerals Separation”), Irkutsk, Russia

<sup>б</sup>Irkutsk National Research Technical University, Irkutsk, Russia

**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 composition. Chalcopyrite contains carbonated diorites. Chalcopyrite and pyrite are predominant elements in ore composition. Chalcopyrite contains almost all of the copper. The second type includes the ore zones of secondary sulfide concentration. This type is composed of primary and secondary copper sulfides. All the rocks are dirty argillaceous and are represented by metasomatic rocks of different composition. All types of rocks feature ore mineralization. The third type covers oxidized ores, which form the oxidation zone of the deposit. They are divided into three subtypes: clay, claydetrital and detrital ores. Clay ores occur in the uppermost parts of the crust of weathering. Clay-detrital ores compose its central part, while ores in detrital formations have been found in the lower horizons. Each of the type is given a petrographic description. Mineralogical and structural-textural features of ores are identified. The study of the petrographic composition of each type of ores showed a varying degree of metamorphism that resulted in changes in ore mineralization.

**Conclusions.** The influence of metasomatic processes is indicated. The last have changed the structure and mineral composition of ores. The presence of primary rocks – diorites with saturated sulfide impregnation and insignificant metasomatic alterations is typical for the first type of ore. The rocks in the zone of secondary concentration have undergone intense metasomatic alteration. These rocks are saturated with iron hydroxides. The presence of clay and chloritized rocks characterize the zone of intense weathering. Ore mineralization is represented exclusively by oxidized minerals. Sulfides are rare. Variations in the mineral composition of the three types of ores influence the choice of ore processing methods at Tominskoye ore deposit.

**Keywords:** Tominskoye field, porphyry copper mineralization, metamorphism, technological ore types

**Acknowledgements:**

Далее идут **текст статьи** (в виде: введение, цель исследования, материалы и методы исследования, результаты исследования и их обсуждение, заключение (выводы)), **библиографический список** (references), **критерии авторства** (authorship criteria) и **конфликт интересов** (conflict of interests).

**Сведения об авторах / Information about the authors**



Фото  
автора

**Курчевская Елена Михайловна,**  
старший научный сотрудник,  
НИИПИ «Технологии обогащения минерального сырья»,  
664074, г. Иркутск, ул. Лермонтова, 83а, Россия,  
e-mail: kurchevskaya@tomsgroup.ru  
**Elena M. Kurchevskaya,**  
Senior Researcher,  
Scientific Research and Design Institute “Technologies of Minerals Separation”,  
83a, Lermontov St., Irkutsk, 664074, Russia,  
e-mail: kurchevskaya@tomsgroup.ru



Фото  
автора

**Яхно Марина Владиславовна,**  
старший преподаватель кафедры геологии и геохимии полезных ископаемых,  
Иркутский национальный исследовательский технический университет,  
664074, г. Иркутск, ул. Лермонтова, 83, Россия,  
✉ e-mail: ymar@istu.edu  
**Marina V. Yakhno,**  
Senior Lecturer of the Department of Geology and Geochemistry of Minerals,  
Irkutsk National Research Technical University,  
83, Lermontov St., Irkutsk, 664074, Russia,  
✉ e-mail: ymar@istu.edu



Фото  
автора

**Сенченко Аркадий Евгеньевич,**  
генеральный директор,  
НИИПИ «Технологии обогащения минерального сырья»,  
664074, г. Иркутск, ул. Лермонтова, 83а, Россия,  
e-mail: senchenko@tomsgroup.ru  
**Arkady E. Senchenko,**  
CEO,  
Scientific Research and Design Institute “Technologies of Minerals Separation”,  
83a, Lermontov St., Irkutsk, 664074, Russia,  
e-mail: senchenko@tomsgroup.ru

# НАУКИ О ЗЕМЛЕ И НЕДРОПОЛЬЗОВАНИЕ

12+

Научный журнал

**Том 42 № 3 (68) 2019**

Дизайнер А.А. Хохряков  
Редактор Ф.А. Посысоева  
Перевод на английский язык Е.Н. Петровой  
Компьютерная верстка Ф.А. Посысоевой

Издание распространяется бесплатно

Выход в свет 30.09.2019 г. Формат 60×90/8.  
Бумага офсетная. Печать цифровая. Усл. печ. л. 15,5.  
Тираж 500 экз. Зак. 201. Поз. плана 4н.

Отпечатано в типографии Издательства  
ФГБОУ ВО «Иркутский национальный  
исследовательский технический университет»,  
адрес типографии: 664074, Россия, г. Иркутск, ул. Лермонтова, 83

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