

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

# **НАУКИ О ЗЕМЛЕ И НЕДРОПОЛЬЗОВАНИЕ**

**Tom 44 № 3 2021**  
**Vol.**

## **EARTH SCIENCES AND SUBSOIL USE**



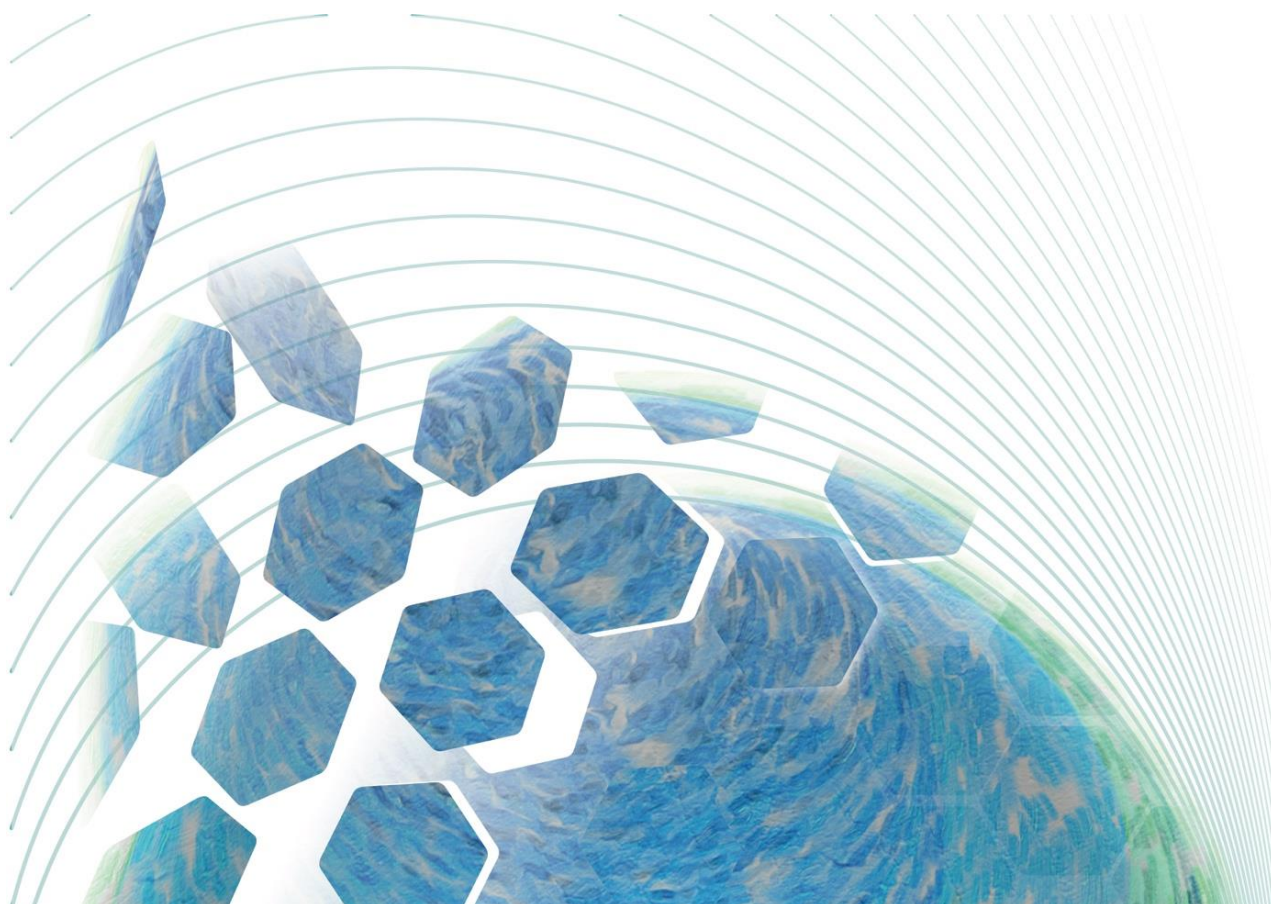
ISSN 2686-9993 (print)  
ISSN 2686-7931 (online)

# НАУКИ О ЗЕМЛЕ И НЕДРОПОЛЬЗОВАНИЕ

Том 44 № 3 2021  
Vol.

## EARTH SCIENCES AND SUBSOIL USE

NAUKI O ZEMLE  
I NEDROPOL'ZOVANIE





## Редакционный совет

**Кузьмин М. И.**, академик РАН, Институт геохимии СО РАН (г. Иркутск, Россия)  
**Гладкочуб Д. П.**, член-корр. РАН, Институт земной коры СО РАН (г. Иркутск, Россия)  
**Скляров Е. В.**, член-корр. РАН, Институт земной коры СО РАН (г. Иркутск, Россия)  
**Гордиенко И. В.**, член-корр. РАН, Геологический институт СО РАН (г. Улан-Удэ, Россия)  
**Корольков А. Т.**, д-р геол.-минерал. наук, проф., Иркутский государственный университет (г. Иркутск, Россия)  
**Макаров В. А.**, д-р геол.-минерал. наук, проф., Сибирский федеральный университет (г. Красноярск, Россия)  
**Очир Гэрэл**, д-р геол.-минерал. наук, проф., Монгольский университет науки и технологии (г. Улан-Батор, Монголия)  
**Тальгамер Б. Л.**, д-р техн. наук, проф., Иркутский национальный исследовательский технический университет (г. Иркутск, Россия)  
**Ши Гуаньхай**, проф., Геммологический институт Китайского геологического университета (г. Пекин, Китай)  
**Чжао Цзюньмэн**, проф., Институт изучения Тибетского плато Китайской академии наук (г. Пекин, Китай)  
**Чжан Юнчжань**, проф., Нанкинский университет (г. Нанкин, Китай)  
**Шигин А. О.**, д-р техн. наук, доцент, Сибирский федеральный университет (г. Красноярск, Россия)  
**Семинский К. Ж.**, д-р геол.-минерал. наук, Институт земной коры СО РАН (г. Иркутск, Россия)  
**Корняков М. В.**, д-р техн. наук, доцент, ректор, Иркутский национальный исследовательский технический университет (г. Иркутск, Россия)  
**Тимофеева С. С.**, д-р техн. наук, проф., Иркутский национальный исследовательский технический университет (г. Иркутск, Россия)  
**Зелинская Е. В.**, д-р техн. наук, проф., Иркутский национальный исследовательский технический университет (г. Иркутск, Россия)  
**Морин А. С.**, д-р техн. наук, проф., Сибирский федеральный университет (г. Красноярск, Россия)

### *Председатель редакционного совета:*

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

## Редакционная коллегия

### *Главный редактор:*

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

### *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. Журнал включен в научную электронную библиотеку CyberLeninka, в базы данных открытого доступа DOAJ, OAJI, в международный каталог периодических изданий Ulrich's Periodicals Directory, в базу данных EBSCO. Журнал распространяется по подписке в каталоге агентства ЗАО ИД «Экономическая газета» «Объединенный каталог. Пресса России. Газеты и журналы», подписной индекс – 41538 (ОК+ЭК) (адрес агентства ЗАО ИД «Экономическая газета»: 8 (499) 1520989; izdatcat@ideg.ru). Статьи, опубликованные в журнале, реферируются и рецензируются. В журнал принимаются статьи по научному направлению «Науки о Земле».

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

Периодичность выхода – 4 раза в год

### Учредитель:

ФГБОУ ВО «Иркутский национальный исследовательский технический университет»

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

### Регистрационный номер:

ПИ № ФС77-76110 от 24.06.2019 г.

### Адрес редакции, учредителя и издателя:

ФГБОУ ВО «Иркутский национальный исследовательский технический университет»,  
664074, Россия, г. Иркутск, ул. Лермонтова, 83

© ФГБОУ ВО «Иркутский национальный  
исследовательский технический  
университет», 2021



## Editorial Council

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

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

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

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

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

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

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

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

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

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

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

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

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

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

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

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

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

*Chairman of the Editorial Council*

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

## Editorial Board

*Editor-in-Chief*

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

*Deputy Editors-in-Chief*

**Auzina L. I.**, Cand. Sci. (Geol. & Mineral.), 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. The journal is included in CyberLeninka (the scientific electronic library), DOAJ, OAJI (open-access databases), Ulrich's Periodicals Directory, and EBSCO database. It is distributed through the catalog of JSC "Economic Newspaper" Publishing House "The united catalog. Russian press. Newspapers and journals", the subscription index 41538 (OK+EC) (address of JSC "Economic Newspaper" Publishing House: 8 (499) 1520989; izdatcat@ideg.ru). The articles published in the journal are abstracted and peer-reviewed. The journal accepts articles related to the "Earth sciences" direction.

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

Periodicity: 4 times a year

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

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

Registration No.:  
PI no. FS77-76110 of June 24, 2019

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

© Federal State Budget Educational  
Institution of Higher Education  
"Irkutsk National Research  
Technical University", 2021





## СОДЕРЖАНИЕ

Содержание.....	200
-----------------	-----

Колонка главного редактора.....	202
---------------------------------	-----

### Геоинформатика

Чжоу Юнчжан, Чжан Цяньлун, Шэнь Вэньцзе, Сяо Фань, Чжан Яньлун, Чжоу Шиу, Хуан Юнцзянь, Цзи Цзюньцзе, Тан Лэй, Оуян Чун. Построение и применение графа знаний медно-порфировых месторождений.....	204
---	-----

Ван Гунвэнь, Чжан Шоутин, Янь Чанхай, Пан Чжэньшань, Ван Хунвэй, Фэн Чжанькуй, Дун Хун, Чэн Хунтао, Хэ Яцин, Ли Жуйси, Чжан Чжицян, Хуан Лэйлэй, Го Нана. Совместное прогнозирование ресурсов и окружающей среды с использованием интеллектуального анализа больших данных и 3D/4D-моделирования в горнодобывающем районе Луаньчуань, Китай.....	219
--	-----

### Гидрогеология и инженерная геология

Сурмаажав Д., Ариунаа Ч. К вопросу оценки запасов месторождения термальных вод источника Хульж.....	243
---	-----

Кураличева А. И., Ланкин Ю. К., Наумова О. О. Неотектонические условия формирования и локализация запасов подземных вод переуглубленных участков долины реки Китой.....	253
---	-----

### Разведка и разработка месторождений полезных ископаемых

Тузев Е. В., Кутузова Т. Ю. Технологические решения в бурении трапповой интрузии на Среднеботуобинском нефтегазоконденсатном месторождении (Восточная Сибирь).....	261
--	-----

Чичерин И. В., Федосенков Б. А. Динамическое модальное управление движением беспилотных транспортных средств в условиях открытых горных работ.....	271
--	-----

Хлыстов О. М., Вайнер-Кротов А. В., Китаев А. В., Погодаева Т. В. Находки углей Танхойского поля в донных отложениях Южного Байкала.....	285
--	-----

Янникова С. А., Янников А. М. Газодинамическая характеристика вмещающих пород глубоких горизонтов шахтного поля трубки «Мир».....	293
---	-----

Агеенков Е. В., Ситников А. А., Воднева Е. Н. Проявление сигнала вызванной поляризации на многоразносных установках в условиях акваторий с глубиной моря до 100 м.....	301
--	-----

Хрунина Н. П. Совершенствование комплекса средств для гравитационной переработки полиминеральных глинистых песков россыпей Приамурья.....	312
---	-----

Галайда К. П., Тальгамер Б. Л. Процесс формирования осыпей на нерабочих бортах карьеров и его влияние на восстановление растительности.....	323
---	-----

Сербин Д. В., Дмитриев А. Н., Васильев Н. И. Устройство для бурения плавлением с одновременным или последующим расширением скважин во льду.....	333
---	-----

К сведению авторов.....	344
-------------------------	-----





## CONTENTS

Contents.....	201
---------------	-----

Chief Editor's Column.....	203
----------------------------	-----

### Geoinformatics

<b>Zhou Yongzhang, Zhang Qianlong, Shen Wenjie, Xiao Fan, Zhang Yanlong, Zhou Shiwu, Huang Yongjian, Ji Junjie, Tang Lei, Ouyang Chong.</b> Construction and applications of knowledge graph of porphyry copper deposits.....	204
---	-----

<b>Wang Gongwen, Zhang Shouting, Yan Changhai, Pang Zhenshan, Wang Hongwei, Feng Zhankui, Dong Hong, Cheng Hongtao, He Yaqing, Li Ruixi, Zhang Zhiqiang, Huang Leilei, Guo Nana.</b> Resource-environment joint forecasting using big data mining and 3D/4D modeling in Luanchuan mining district, China.....	219
---	-----

### Hydrogeology and Engineering Geology

<b>Surmaajav D., Ariunaa Ch.</b> To reserves estimation of Khulj hot spring.....	243
--	-----

<b>Kuranicheva A. I., Lankin Y. K., Naumova O. O.</b> Neotectonic formation and localization conditions of groundwater reserves in over-deepened sections of the Kitoy River valley.....	253
--	-----

### Exploration and Development of Mineral Deposits

<b>Tuzov Y. V., Kutuzova T. Yu.</b> Technological solutions for drilling a trap intrusion section on the Srednebotuobinskoe oil gas condensate field, East Siberia.....	261
---	-----

<b>Chicherin I. V., Fedosenkov B. A.</b> Dynamic modal control of unmanned vehicle movement in open pit mining.....	271
---	-----

<b>Khlystov O. M., Vainer-Krotov A. V., Kitaev A. V., Pogodaeva T. V.</b> Occurrence of Tankhoy field coals in South Baikal bottom sediments.....	285
---	-----

<b>Yannikova S. A., Yannikov A. M.</b> Gas-dynamic characteristics of the host rocks of Mir pipe mine field deep horizons.....	293
--	-----

<b>Ageenkov E. V., Sitnikov A. A., Vodneva E. N.</b> Induced polarization signal manifestation in multi-spacing installations in off-shore areas up to 100 m deep.....	301
--	-----

<b>Khrunina N. P.</b> Improving the complex of technical facilities for gravitational processing of polymineral clay sands of Amur river basin placers.....	312
---	-----

<b>Galaida K. P., Talgamer B. L.</b> Scree formation on nonmining flank of an opencast and its impact on vegetation restoration.....	323
--	-----

<b>Serbin D. V., Dmitriev A. N., Vasiliev N. I.</b> Device for fusion drilling with simultaneous or follow-up reaming of wells in ice.....	333
--	-----

Information for the Authors.....	344
----------------------------------	-----





### Добрый день, уважаемые читатели!



Очередной номер нашего журнала продолжает уже сложившуюся традицию публикации научных статей российских и зарубежных ученых по широкому кругу проблем геологических наук не только на русском, но и на других языках. Сегодня мы публикуем статьи наших китайских коллег, касающиеся чрезвычайно интересных результатов геоинформационных исследований при построении и использовании графа знаний и анализа больших данных, совмещенного с 3D-4D-моделированием, на крупных рудных месторождениях Китая, а также статьи монгольских и сибирских гидрогеологов по оценке запасов термальных и холодных подземных вод.

Большой блок статей этого номера журнала посвящен различным проблемам разведки и разработки месторождений полезных ископаемых: технологическим аспектам бурения трапповой интрузии нефтегазоконденсатного Среднеботуобинского месторождения, использованию беспилотных транспортных средств в условиях открытых горных работ, находкам углей в донных отложениях Байкала, газодинамическим характеристикам пластов в районе алмазоносной трубки «Мир», геофизическим исследованиям морских акваторий и инженерно-геологическим исследованиям при добыче полезных ископаемых открытым способом.

Неизменно широким остается и географический охват авторами журнала рудных территорий, включающий Сибирь, Дальний Восток, Монголию и Китай. Публикация в течение последних трех лет статей не только на русском, но и на английском языке существенно повысила интерес к нашему журналу зарубежных коллег и, как следствие, его общий рейтинг. Редакционная коллегия постоянно работает над поддержанием высокого уровня публикуемых статей, в связи с чем мы обращаемся ко всем постоянным и потенциальным авторам журнала с просьбой с пониманием относиться к требованиям, которые мы предъявляем к вашим работам, стараясь не опускать планку современного уровня научных публикаций. Ждем от вас статей с интересными глубокими исследованиями и неординарными результатами.

Желаем всем вам огромных успехов на благо геологической науки!

**Лобацкая Раиса Моисеевна,  
главный редактор**



### From the Editor

This issue of our journal continues the established tradition of publishing scientific articles by Russian and foreign scientists on a wide range of problems in geological sciences both in Russian and other languages. Today we publish the articles by our Chinese colleagues dealing with the highly interesting results of geoinformation research in the construction and use of a knowledge graph and big data analysis combined with 3D-4D modeling at large ore deposits in China, as well as the articles by Mongolian and Siberian hydrogeologists concerning the assessment of thermal and cold groundwater reserves.

A considerable number of the articles in this issue is devoted to various problems of exploration and development of mineral deposits including technological aspects of drilling a trap intrusion of the Srednebotuobinskoye oil and gas condensate field, use of unmanned vehicles in open mining, coal discovery in Lake Baikal bottom sediments, gas-dynamic characteristics of layers in the area of the diamond-bearing pipe Mir, geophysical research of sea areas, and engineering and geological research under open-mining of minerals.

We are determined to preserve the wide geographical coverage of the ore territories by the journal authors including Siberia, the Far East, Mongolia and China. The publication of articles in English as well as in Russian over the past three years has significantly increased the interest of foreign colleagues for our journal and, as a result, raised its overall rating. The editorial board keeps working in order to maintain a high level of the published articles. In this connection we request all the permanent and potential authors of the journal to treat the requirements for your works to be met with understanding as we try to sustain the high modern level of scientific publications. We are looking forward for your articles with thought-provoking in-depth research and extraordinary results.

Wishing you a great success for the benefit of the geological science!

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



## GEOINFORMATICS

Original article

<https://doi.org/10.21285/2686-9993-2021-44-3-204-218>

## Construction and applications of knowledge graph of porphyry copper deposits

Yongzhang Zhou<sup>a</sup>, Qianlong Zhang<sup>b</sup>, Wenjie Shen<sup>c</sup>, Fan Xiao<sup>d</sup>, Yanlong Zhang<sup>e</sup>,  
Shiwu Zhou<sup>f</sup>, Yongjian Huang<sup>g</sup>, Junjie Ji<sup>h</sup>, Lei Tang<sup>i</sup>, Chong Ouyang<sup>j</sup>

<sup>a-d,h-j</sup>Sun Yat-sen University, Guangzhou, China

<sup>a-d,h-j</sup>Guangdong Provincial Key Lab of Geological Processes and Mineral Resource Survey, Guangzhou, China

<sup>e,f</sup>Guangdong Institute of High Quality Resources and Environment, Guangzhou, China

<sup>g</sup>Guangdong Xuanyuan Network Tech. Inc., Guangzhou, China

Corresponding author: Yongzhang Zhou, [zhouyz@mail.sysu.edu.cn](mailto:zhouyz@mail.sysu.edu.cn)

**Abstract.** A knowledge graph is becoming popular due to its ability to describe the real world by using a graph language that can be understood by both humans and machines using computer technologies. A case study to construct the knowledge graph of porphyry copper deposits is presented in this paper. First of all, the raw text data is collected and integrated from selected porphyry copper deposits and porphyry-skarn copper deposits in the Qinzhou Bay – Hangzhou Bay metallogenic belt, South China. Second, the text's entities, relations, and attributes are labeled and extracted with reference to the conceptual model of porphyry copper deposits in the study area. The third, a knowledge graph of porphyry copper deposits, was constructed using Neo4j 4.3. The resulted knowledge graph of porphyry copper deposit has the basic functions of an application. Furthermore, as part of a planned integrated knowledge graph from a single deposit, through an upper-gear metallogenic series, to a high-top metallogenic province, the understanding from the present study may be extended to mineral resource prospectivity and assessment beyond today. The interrelationship between the earth system, the metallogenic system, the exploration system, and the prospectivity and assessment (ES-MS-ES-PS) should be completely understood, and a knowledge graph system for ES-MS-ES-PS is needed. The key scientific and technological problems for achieving the ES-MS-ES-PS knowledge graph system are included in the progressively relative system of the domain ontology and knowledge graph of ES-MS-ES-PS, the automatic construction technology of complicated ES-MS-ES-PS domain ontology and knowledge graph, the self-evolution and complementary techniques for multi-modal correlation data embedding in the ES-MS-ES-PS knowledge graph, and the knowledge graph, big data mining and artificial intelligence based on ES-resource prospectivity, and assessment theory, and methods.

**Keywords:** geological knowledge graph, geological big data, prospectivity and assessment of mineral resource, domain ontology, porphyry copper deposit

**Funding:** this work was supported by the Major Project of the National Natural Science Foundation of China (U1911202); Guangdong Provincial Key R&D Project (2020B1111370001); Guangdong Provincial Science and Technology Commissioner Project (GDKTP2020053500).

**For citation:** Zhou Yongzhang, Zhang Qianlong, Shen Wenjie, Xiao Fan, Zhang Yanlong, Zhou Shiwu, et al. Construction and applications of knowledge graph of porphyry copper deposits. *Nauki o Zemle i nedropol'zovanie = Earth sciences and subsoil use*. 2021;44(3):204-218. <https://doi.org/10.21285/2686-9993-2021-44-3-204-218>.





## ГЕОИНФОРМАТИКА

Оригинальная статья  
УДК 550.8.053

### Построение и применение графа знаний медно-порфировых месторождений

Юнчжан Чжоу<sup>a</sup>, Цяньлун Чжан<sup>b</sup>, Вэньцзе Шэнь<sup>c</sup>, Фань Сяо<sup>d</sup>, Яньлун Чжан<sup>e</sup>,  
Шиу Чжоу<sup>f</sup>, Юнцзянь Хуан<sup>g</sup>, Цзюньцзе Ци<sup>h</sup>, Лэй Тан<sup>i</sup>, Чун Оуян<sup>j</sup>

<sup>a-d,h-j</sup>Университет им. Сунь Ятсена, г. Гуанчжоу, Китай

<sup>a-d,h-j</sup>Центральная лаборатория службы геологических процессов и минеральных ресурсов  
провинции Гуандун, г. Гуанчжоу, Китай

<sup>e,f</sup>Гуандунский институт высококачественных ресурсов и окружающей среды, г. Гуанчжоу, Китай

<sup>g</sup>Компания Гуандун Сюаньюань Сеть и Технологии Инкорпорейтед, г. Гуанчжоу, Китай

Автор, ответственный за переписку: Чжоу Юнчжан, zhouyz@mail.sysu.edu.cn

**Резюме.** Граф знаний становится популярным благодаря своей способности описывать с использованием компьютерных технологий реальный мир при помощи языка графов, понятного как людям, так и машинам. В данной статье представлен пример построения графа знаний медно-порфировых месторождений. Во-первых, необработанные текстовые данные собраны и интегрированы по выбранным месторождениям медно-порфировых и скарново-порфировых медных месторождений в металлогеническом поясе заливов Циньчжоу – Ханчжоу Южного Китая. Во-вторых, текстовые сущности, отношения и атрибуты помечены и извлечены со ссылкой на концептуальную модель медно-порфировых месторождений в районе исследования. В-третьих, граф знаний медно-порфировых месторождений был построен с использованием Neo4j 4.3. Полученный граф знаний месторождения медно-порфировых руд имеет основные функции приложения. Кроме того, как часть запланированного интегрированного графа знаний от единичного месторождения транслируется через металлогеническую серию до крупной металлогенической провинции, поэтому результаты настоящего исследования могут быть со временем распространены на перспективность и оценку минеральных ресурсов других месторождений. Взаимосвязь между земной системой, металлогенической системой, системой разведки и оценки перспективности (ES-MS-ES-PS) должна быть полностью понята, а для этого необходима система графа знаний для ES-MS-ES-PS. Ключевые научные и технологические проблемы для создания системы графа знаний ES-MS-ES-PS включены в прогрессивную относительную систему онтологии предметной области и графа знаний ES-MS-ES-PS, технологии автоматического построения сложных онтологий предметной области MS-ES-PS и графа знаний, саморазвитие и дополнительные методы для встраивания данных многомодальной корреляции в граф знаний ES-MS-ES-PS, а также построение графа знаний, интеллектуальный анализ больших данных и искусственный интеллект на основе перспективности ресурсов земной коры, теории и методов оценки.

**Ключевые слова:** граф геологических знаний, большие геологические данные, перспективность и оценка минеральных ресурсов, онтология предметной области, медно-порфировое месторождение

**Финансирование:** данное исследование проводилось при поддержке Основного проекта Государственного фонда естественных наук Китая (U1911202), стратегического научно-исследовательского проекта провинции Гуандун (2020B1111370001), проекта уполномоченного по науке и технологиям провинции Гуандун (GDKTP2020053500).

**Для цитирования:** Чжоу Юнчжан, Чжан Цяньлун, Шэнь Вэньцзе, Сяо Фань, Чжан Яньлун, Чжоу Шиу [и др.]. Построение и применение графа знаний медно-порфировых месторождений // Науки о Земле и недропользование. 2021. Т. 44. № 3. С. 204–218. <https://doi.org/10.21285/2686-9993-2021-44-3-204-218>.

#### Introduction

In the present era of big data, data grows explosively, and it tends to be massive, heterogeneous, and loosely organized, bringing serious challenges to effective access to information and knowledge. The fundamental way out is to extend the human brain with the help of machine and machine learning, which urgently needs a language that people and machines can understand together [1–3].

The knowledge graph is one among these technologies. It is an integral part of artificial intelligence technology, known as interpretable artificial intelligence. With its powerful semantic processing ability and open organization ability, it provides an effective tool for knowledge organization and intelligent applications of information in the era of big data. Since the knowledge graph was formally proposed by Google in 2012, it has attracted much attention of researchers and has



been widely used in intelligent search, intelligent Q & A, personalized recommendation, and so on [4–12]<sup>1</sup>.

This paper presents a case study to construct the knowledge graph, with a porphyry copper mine as a carrier. It introduces the construction algorithm of the geological deposit domain knowledge graph and discusses the extended idea of knowledge graph to Earth system - Metallogenic system - Exploration system - Prediction and evaluation system.

### Methodology

The basis of the knowledge graph is a semantic network to reveal the relationship between entities [13]. It describes the real-world things and their relations in the way of “graph” and stores them in the database in the way of “entity-relationship – entity” triple. As a network, it consists of nodes and edges. A node represents an entity: all kinds of things, existence, and concepts in the real world, which can be either a concrete entity or an abstract concept, such as a known ore point or an abstract porphyry copper concept. Edge represents the relationship between entities, which is represented as attributes in many scenes, such as the location of ore point, rock mass, element content or mineralization time, and process of an ore occurrence. Figure 1 is the representation diagram of knowledge graph entity, attribute, and relationship.

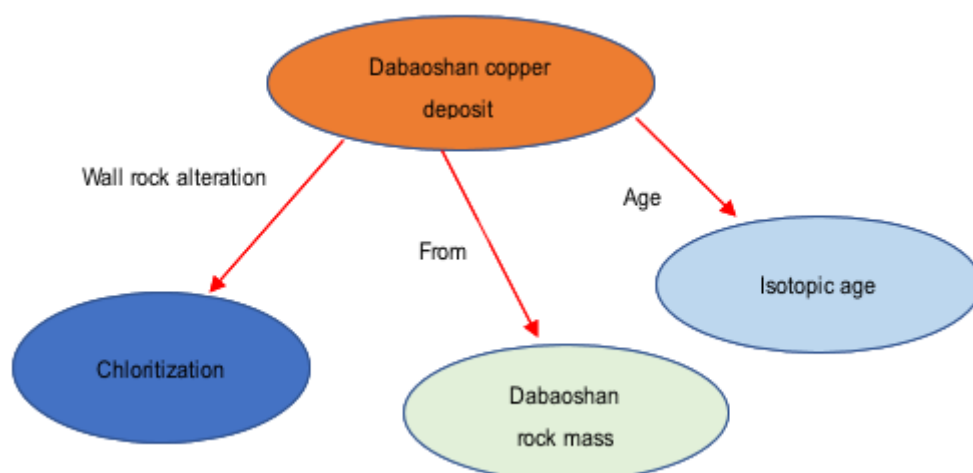
The complete knowledge graph architecture includes Knowledge acquisition, Knowledge

representation, Knowledge storage, Knowledge modeling, Knowledge fusion, Knowledge Computing, Knowledge operation, and maintenance, etc. It is included among the next key technologies and processes:

**Ontology modeling.** The data model of the knowledge graph is established. In the ontology model, it is needed to construct the concept, attribute, and relationship of ontology. The process of ontology modeling is the basis of the knowledge graph. The high-quality data model can avoid many unnecessary and repetitive knowledge acquisitions, effectively improve the efficiency of knowledge graph and reduce the cost of domain data fusion.

**Knowledge acquisition.** In the real world, knowledge exists in structured, semi-structured, and unstructured data. Through knowledge extraction technology, different structures and types of data can be extracted into structured data that can be understood and calculated by computer. Knowledge acquisition is to extract knowledge from data of different sources and structures, form structured knowledge and store it in the knowledge graph. For text data, the extraction problems of knowledge acquisition include entity extraction, relationship extraction, attribute extraction, and event extraction.

**Knowledge storage.** The underlying storage method is designed to store all kinds of knowledge, so as to support the effective management and calculation of large-scale graph data. The objects of knowledge storage include



**Fig. 1. Schematic diagram showing the entity, attributes, and relations of a knowledge graph**

**Рис. 1. Схематическая диаграмма, показывающая сущность, атрибуты и отношения графа знаний**

<sup>1</sup> Peak labs. About OpenKG.CN. Professional Committee of Language and Knowledge Computing Chinese Information Processing Society of China. Available from: [http://wp.openkg.cn/?page\\_id=77](http://wp.openkg.cn/?page_id=77) [Accessed 28<sup>th</sup> February 2021].



basic attribute knowledge, association knowledge, event knowledge, time sequence knowledge, and resources knowledge et. The quality of knowledge storage directly affects the efficiency of knowledge query, knowledge calculation, and knowledge update in the knowledge graph.

**Knowledge fusion.** Knowledge fusion aims at generating new knowledge and integrating the knowledge from loosely coupled sources to form a synthetic resource to supplement incomplete knowledge and acquire new knowledge. It is an interdisciplinary subject of knowledge organization and information fusion. Hidden or valuable new knowledge can be obtained, the structure and connotation of knowledge be optimized, and knowledge services be provided, through the acquisition, matching, integration, mining, and other processing methods of knowledge on many scattered and heterogeneous resources.

**Knowledge operation and maintenance.** It is necessary for the real scene to iterated or evolve and improve the full knowledge graph according to the application feedback, the emerging knowledge of the same type, and the new knowledge sources after the initial construction of the knowledge graph. In the process of knowledge operation and maintenance, it is needed to ensure that the quality of the knowledge graph can be well controlled and gradually enriched. The operation and maintenance process of a knowledge graph is an engineering system, covering the whole life cycle of knowledge graph from knowledge acquisition to knowledge computing.

Usually, three basic steps are needed in the construction of a knowledge graph: (1) Information extraction, which extracts entities, attributes, and relationships among entities from unstructured and semi-structured data sources. (2) Information fusion, which eliminates the ambiguity of concepts, eliminates redundant and wrong concepts and ensures the quality of knowledge. (3) Knowledge processing, which includes quality evaluation or reasoning expansion of knowledge to obtain structured and networked knowledge system.

Structured data and text ones are the main sources of knowledge. The more commonly used

tools for acquiring knowledge from structured databases are Triplify, D2RServer, OpenLink, SparqlMap, Ontop, etc. Knowledge graph visualization has Citespace, Protégé, Neo4j, and so on. Citespace is an information visualization software developed by using java language. Based on co-citation analysis theory and pathfinder algorithm, Citespace measures the literature (collections) in specific fields to find out the key path and knowledge inflection point of discipline evolution. By drawing a series of visual graphs, the potential dynamic mechanism of discipline evolution can be analyzed, and the frontier of discipline development be explored. Protégé is open-source software for ontology editing and knowledge acquisition developed by the Center for Bioinformatics, Stanford Medical School, based on Java language. Protégé is an ontology development tool and a knowledge-base editor. It is the core development tool of ontology construction in the semantic web. It provides the construction of ontology concept class, relationship, attribute and instance, and shields the specific ontology description language. Users only need to construct a domain ontology model at the conceptual level. Neo4j is a high-performance NoSQL graphic database, which stores structured data on the network. It is a high-performance graph engine, with the advantages of embedded, high performance, lightweight, and so on [14–16]<sup>2</sup>.

### **Knowledge graph of porphyry copper deposits**

The main processes are involved in constructing the Knowledge graph of porphyry copper deposits as following:

(1) Raw data acquisition. In the Qinzhou Bay – Hangzhou Bay metallogenic belt of South China, six porphyry copper deposits and porphyry skarn-type copper deposits are selected as the experimental objects. The Dexing copper deposit, Yongping copper deposit, Qibaoshan copper deposit, Baoshan copper deposit, Dabaoshan copper deposit, and Yuanzhuding copper deposit are included among them. The relevant geological and mineral survey and published academic papers are systematically collected to form the initial data.

<sup>2</sup>Neo Technology, Inc. Neo4j, the world's leading graph database. *Neo4j Graph Database*. Available from: <http://neo4j.com/> [Accessed 28<sup>th</sup> February 2021].





(2) The initial data acquisition, and the entity, relationship, and attribute annotation and extraction based on the conceptual model of porphyry copper deposit. The Xuanyuan data annotation system is used for data annotation. The annotation system is a general annotation system based on GUI, which allows the annotation file to be divided into multiple annotation tasks and allows multiple users to annotate and review. The system provides data annotation services, including batch storage and management of annotation files, auxiliary tools to simplify the difficulty of manual annotation, and machine annotation for specific fields.

The data extracted from the text is classified and standardized into three tuple formats with five columns: entity, entity type, relationship, attribute and attribute type. The entity is an existence of a deposit, an actual deposit, such as the Dexing porphyry copper deposit. The entity type is the type of deposit, such as porphyry copper deposit. Attribute is the attribute of deposit, which is used to describe the characteristics of deposit. Attribute type is the type of attribute. A section of the standardized CSV data is shown in Table.

(3) Graph generation. Python is used to read data and write them into the Neo4j graph database. Create a new local database in neo4j, name the database, and then import the existing data in CSV format into the py2neo database to generate a knowledge graph (Fig. 2).

The knowledge graph resulted from this case has the basic application function of a normal knowledge graph. In Neo4j, Cypher statements can be used to query the whole database, specific label query, shortest path query, where predicate query, keyword query, relational query,

attribute addition and deletion, label addition and deletion, etc.

Query a label, for example, that has a directed relationship with a node. Input: match (a: `Porphyry copper deposit` {name: `Dexing copper deposit`}) – (b) return a, b, the nodes connected with the Dexing Copper Mine are gotten (Fig. 3), from which the geological information and metallogenic conditions related to the formation of Dexing copper mine are demonstrated.

### Prospect: Knowledge graph of ES-MS-ES-PS

The case above is part of the ongoing experiment to build knowledge graph series from single ore deposit, through metallogenic series, to metallogenic province, aiming at providing a demo for future large-scale construction and application of knowledge graph of ore deposits.

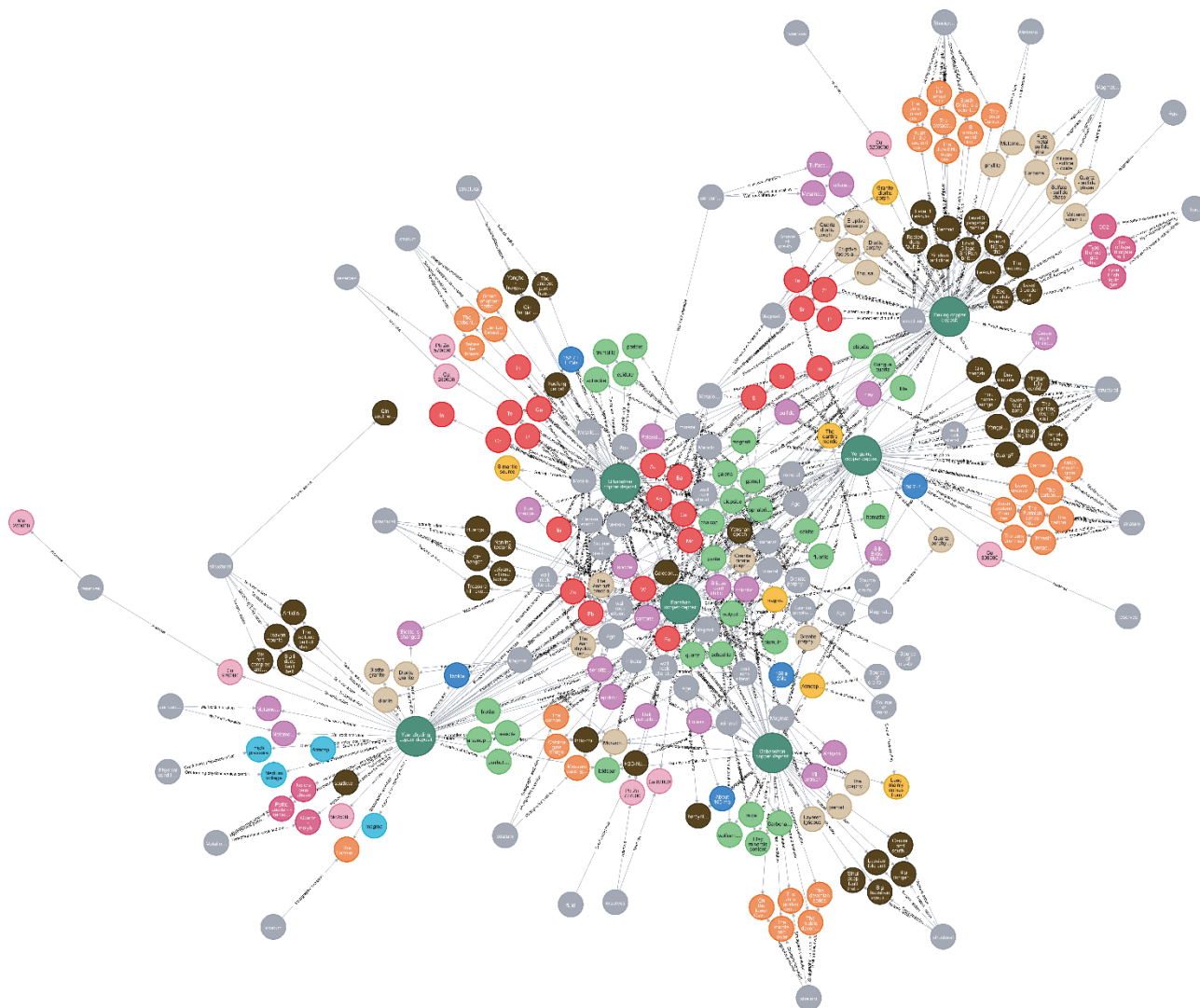
It is reasonable to build the knowledge graph of porphyry copper deposit for the first since its metallogenic model is classic and well recognized by almost all geologists. It is also the main theoretical model for prospecting for porphyry copper deposits. The workload of building an ontology model is relatively controllable. Based on the existing geological survey reports and other unstructured and semi-structured data, through ontology construction, knowledge extraction, knowledge disambiguation, and knowledge fusion, the knowledge graph of porphyry copper deposit may well be constructed. Similarly, the knowledge graph of epithermal metallogenic system (Fig. 4) and Qinzhou Bay – Hangzhou Bay metallogenic belt (Fig. 5) can be constructed.

Individual deposits, metallogenic series, and important metallogenic areas (belts) contain

### Standardized data (part)

#### Стандартизованные данные (часть)

Entity	Entity type	Relationship	Attribute	Attribute type
Yuanzhuding deposit	Porphyry Copper Deposit	Magmatism	Diorite granite	Types of magmatism
Dexing deposit	Porphyry Copper Deposit	Metamorphism	Phyllite	Types of metamorphism
Yongping deposit	Porphyry Copper Deposit	Wall rock alteration	Silicification	Types of wall rock alteration
Qibaoshan deposit	Porphyry Copper Deposit	Stratigraphic evolution	Carboniferous series	Stratigraphic type
Dabaoshan deposit	Porphyry Copper Deposit	Element enrichment and depletion	Cu	Types of element enrichment and depletion



**Fig. 2. Knowledge graph of porphyry copper deposit  
from Qinzhou Bay – Hangzhou Bay metallogenic belt, South China**  
**Рис. 2. Граф знаний медно-порфировых отложений металлогенического пояса  
заливов Циньчжоу – Ханчжоу, Южный Китай**

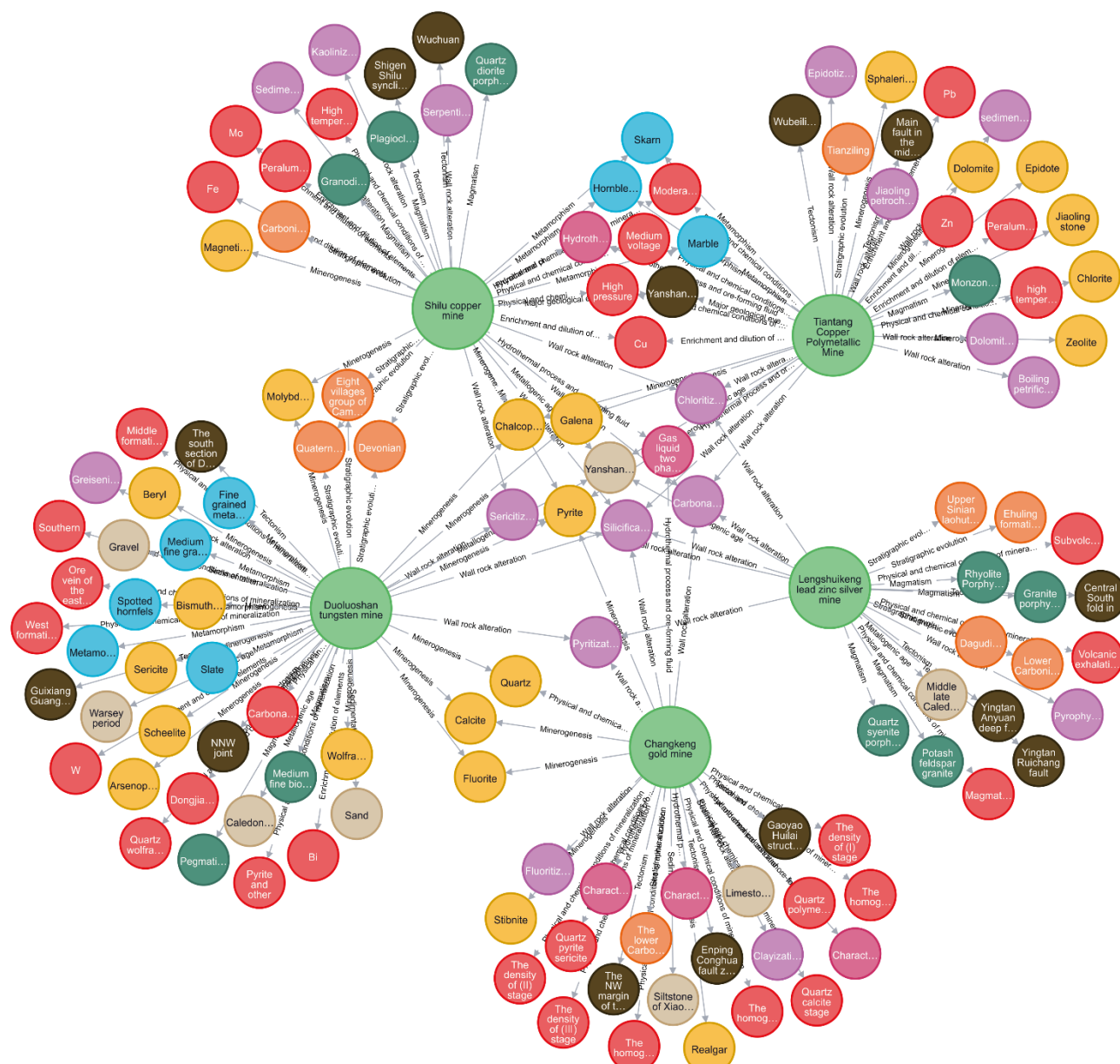
typical relationships of deposits at different levels. The single deposit belongs to the metallogenic series and the important metallogenic area (belt), and its attributes are inherited. The metallogenic series and the important metallogenic area (belt) are intersecting, and their attribute relationship is complex. The construction of a knowledge graph system of individual deposits, metallogenic series, and important metallogenic areas (belts) can provide valuable support for the construction of a larger knowledge graph of Earth system - Metallogenic system - Exploration system - Prediction and evaluation system.

The prediction and evaluation of mineral resources is one of the important directions in the application of geological science and has formed a unique theory and method system [17, 18]. But

generally speaking, the existing metallogenic prediction theories and methods are mainly composed of two parts. The first is the mineral prediction model, which is the metallogenic prediction elements and criteria established by summarizing the metallogenic law of typical deposits and geophysical, geochemical, and remote sensing anomaly characteristics. The second is the mathematical model of prospecting information extraction and fusion, that is, the mathematical model is used to quantify and fuse the corresponding prediction elements in the prediction model, so as to finally estimate the size of metallogenic potential. Most of the research focuses on the mathematical model of prospecting information extraction and fusion. The research on the mineral prediction model mainly depends on the knowledge







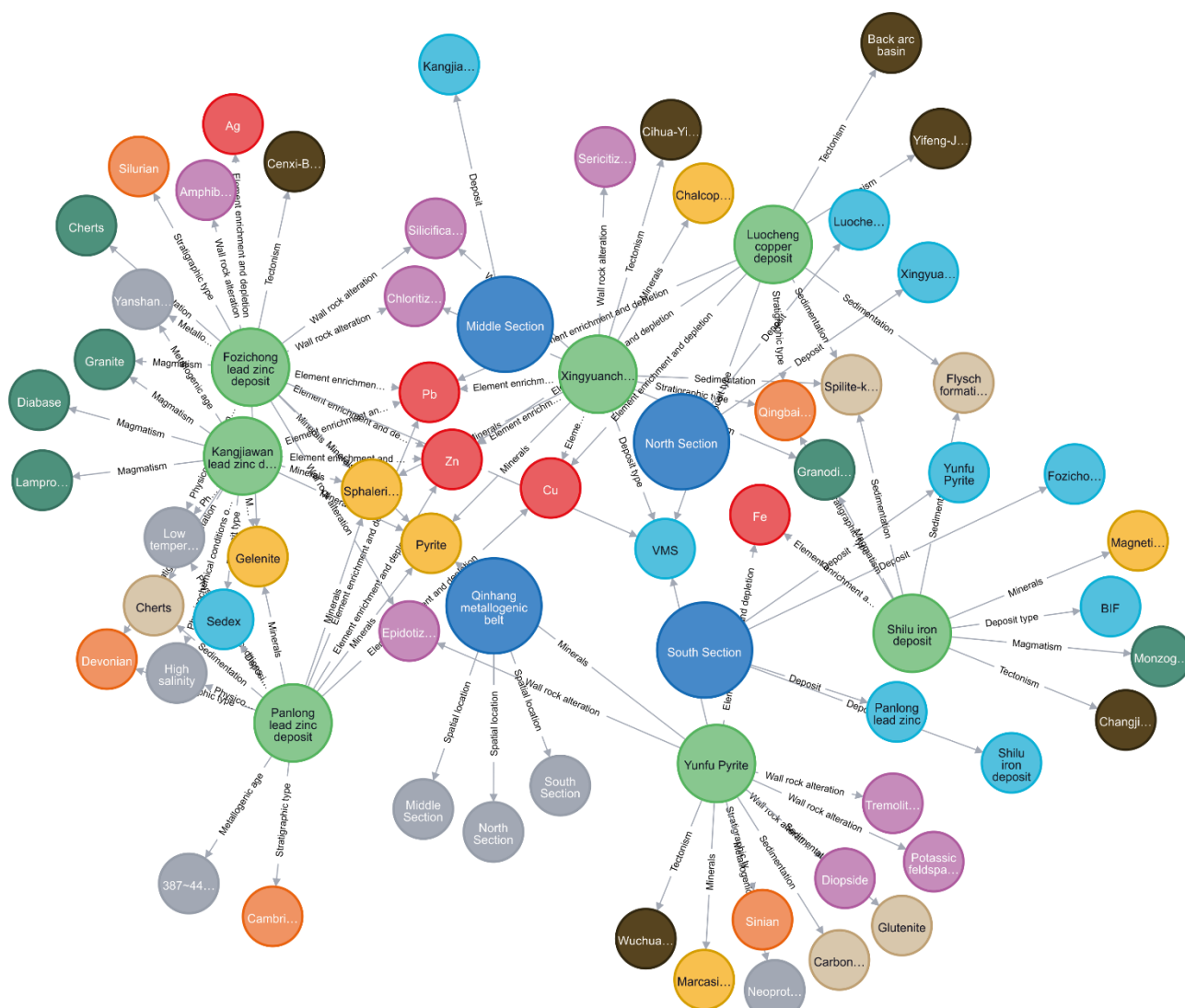
**Fig. 4. The visual interface of knowledge graph of epithermal metallogenic system**  
**Рис. 4. Визуальный интерфейс графа знаний эпипермальной металлогенической системы**

which are both systematic and intricate. This limits the integration of data and knowledge, and also the exploration of the potential of the system. Based on the system association framework of the knowledge graph, the interpretable prediction and evaluation of mineral resources can be formed through the digestion and fusion of knowledge co-index and the community detection and correlation based on graph theory.

The ES-MS-ES-PS can be regarded as self-contained but interrelated systems. Logically, the earth system includes the metallogenic system, which inherits the attributes and relations of the earth system. The earth system has a larger extension, and the metallogenic system has a more

specific connotation. The exploration system and the prediction and evaluation system are the current expert knowledge systems. They are not completely coincident with the actual metallogenic system, and there is an intersection between them.

(2) The ontology construction of ES-MS-ES-PS. Geological big data are considered as the main research object. Firstly, a machine learning algorithm is used to model and associate the knowledge of the Earth system, metallogenic system, exploration system, and prediction and evaluation system under the guidance of the ontology model of ES-MS-ES-PS. Speech tagging has done for text data. Then, the candidate entity



**Fig. 5. The visual section of knowledge graph of the Qinzhou Bay – Hangzhou Bay metallogenic belt**  
**Рис. 5. Визуальный разрез графа знаний металлогенического пояса заливов Циньчжоу – Ханчжоу**

pairs and relationship features are extracted, and the factor graph model method is used to train the extraction rules, which are used to extract the domain entities and semantic relationships of the ES-MS-ES-PS according to the results of part of speech tagging. Finally, the extracted entity and semantic relationship are stored in the form of the graph database, and the knowledge base of ES-MS-ES-PS is established and visualized. The corresponding knowledge graph and data sharing platform of ES-MS-ES-PS are established in order to realize the information retrieval, acquisition, sharing, and logical reasoning of the knowledge base of ES-MS-ES-PS.

Furthermore, taking the geological ontology of ore controlling elements in the fields of ES-MS-ES-PS as a bridge, the ES-MS-ES-PS are organically linked. Furthermore, taking the geological

ontology of ore controlling elements in the fields of ES-MS-ES-PS as a bridge, the ES-MS-ES-PS are organically linked.

Through machine learning, semantic analysis, visual analysis, and other intelligent methods, the ES-MS-ES-PS are analyzed. The in-depth development of knowledge graphs in the field of exploration systems and prediction and evaluation systems provides multi-source, multi-dimensional, spatiotemporal, multi-scale information and knowledge intelligent services for mineral resource prediction and evaluation, improves the breadth, accuracy, and efficiency of deep-sitting prospecting information identification and extraction, and links and integrates prospecting information in the fields of ES-MS-ES-PS. All above will lead to the occurrence of the smart prediction of mineral resources based on ES-MS-ES-P.



(3) Automatic extraction technology of large-scale geological knowledge graph relationship. In the process of automatic acquisition of geological knowledge and construction of knowledge graph, relation extraction is the core and the only way to accomplish this task. The purpose of relation extraction is to extract the relationship between entities from unlabeled self-owned texts, and then structure the entity and relationship into structured knowledge, and extend it into a knowledge graph accordingly. The traditional relational extraction method is based on the construction of a supervised extraction system, and its training and deployment rely heavily on large-scale manually labeled data, which consumes huge time and manpower. This project develops and constructs a remote supervised relation extraction system to make up for the problems existing in the traditional supervised model. At the same time, it explores the introduction of multi-source external information to eliminate the noise problem in remote supervision and alleviate the impact of long-tail data, so as to obtain a more robust geological knowledge extraction system.

(4) Evolving and improving itself of knowledge graph embedding multi-modal association data. Heterogeneity is an unneglectable problem to construct an opening geological knowledge graph. The traditional way to solve ontology heterogeneity is ontology integration. Ontology integration directly merges multiple ontologies into a large ontology, and each heterogeneous system uses the unified ontology. In this way, the interaction between them can be carried out directly, thus solving the problem of ontology heterogeneity. However, the integration of ontology is time-consuming and laborious and lacks automatic method support. With the change of multiple ontologies, the integration process needs to be repeated and the cost is too high. In addition, the integrated ontology is not universal and flexible for different applications. Therefore, ontology integration is not suitable to solve the distributed and dynamic multi ontology application problems in the knowledge graph. In fact, most applications only need to realize the interoperability between ontologies to meet the requirements, and complete integration is not necessary. This project studies the ontology mapping method based

on multi-modal association data embedding. It achieves ontology interoperability by establishing mapping rules between ontologies. At the same time, it introduces a large number of texts, images, and numerical information in the knowledge base, improves the quality of mapping and matching, and realizes the effective completion of the knowledge graph.

(5) Data acquisition, access, and fusion mechanism based on the knowledge graph. Community structure is popular in the geological knowledge graph. Community refers to a group of nodes that are closely related to each other within the community, and their relationship with nodes outside the community is relatively loose. It has many applications to obtain and query community data, identify community structure, analyze the structure and function of the whole network, and predict the interaction between various elements of the network, such as geological network analysis, identification of special geological phenomena, deposit prediction, etc. Traditional community detection only considers the structural features with neglecting the necessary semantic information on the knowledge graph. This project will study the community detection algorithm for knowledge graphs, and introduce attribute-based retrieval, which can effectively improve computational efficiency.

(6) The construction norms and standard system of the geoscience knowledge graph. The standardization of geological knowledge graph is greatly important to improve construction efficiency, ensure data re-use in multiple fields, and give full play to knowledge graph analysis and technical value. This project studies the overall framework of the geological knowledge graph, mainly focusing on knowledge acquisition, knowledge representation, knowledge modeling, knowledge fusion, knowledge storage, knowledge computing, knowledge operation and maintenance, natural language processing, and other related supporting technology fusion, covering the whole life cycle of the knowledge graph, providing guarantee for technology development and application.

## Conclusions

It may be concluded through the analysis above that:





(1) Knowledge graph represents the objects and their relationships in the objective world with the mathematical model of the graph, which makes knowledge and data easier to exchange, circulate, and process between computers and between computers and people. Compared with a traditional relational database, a knowledge graph is more flexible and more suitable for a big data environment. In the era of big data and artificial intelligence, there is an urgent need for a language that people and machines can understand together to extend the human brain.

(2) The construction of the knowledge graph of porphyry copper deposits is a good experiment, it may be well extended to the epithermal metallogenic system and the Qinzhou Bay – Hangzhou Bay, metallogenic belt, South China, resulting in a complete knowledge graph system from the single deposit, through metallogenic

series, to an important metallogenic area (belt). Then a greater knowledge graph system of Earth system - Metallogenic system - Exploration system - Prediction and evaluation system may be expected.

(3) The future mineral resource prediction and evaluation should fully understand the relationship among the Earth system, the metallogenic system, the exploration system, and the prediction and evaluation system. A more universal metallogenic prediction system may be established through open integration and deep mining of different systems or geological big data.

The transformation of quantitative prediction and evaluation of mineral resources may be promoted by the establishment of the associated knowledge graph system of the Earth system - Metallogenic system - Exploration system - Prediction and evaluation system.

### References

1. Zhang Q., Zhou Y. Big data helps geology develop rapidly. *Acta Petrologica Sinica*. 2018;34(11):3167-3172. (In Chinese).
2. Zhou Y., Wang J., Zuo R., Xiao F., Shen W., Wang S. Machine learning, deep learning and Python language. *Acta Petrologica Sinica*. 2018;34(11):3173-3178. (In Chinese).
3. Zhou Y., Zhang L., Zhang O., Wang J. *Big data mining & machine learning in geoscience*. GuangZhou: Sun Yat-sen University Press; 2018. 269 p. (In Chinese).
4. Singhal A. Introducing the Knowledge Graph: things, not strings. *Blog.google*. Available from: <https://www.blog.google/products/search/introducing-knowledge-graph-things-not> [Accessed 28<sup>th</sup> February 2021].
5. Wu W., Li H., Wang H., Zhu K. Q. Probase: a probabilistic taxonomy for text understanding. *Proceedings of the 2012 ACM SIGMOD International Conference on Management of Data*. 2012:481-492. <https://doi.org/10.1145/2213836.2213891>.
6. Hoffart J., Suchanek F. M., Berberich K., Weikum G. YAGO2: a spatially and temporally enhanced knowledge base from Wikipedia. *Artificial Intelligence*. 2013;194:28-61. <https://doi.org/10.1016/j.artint.2012.06.001>.
7. Lukovnikov D., Fischer A., Lehmann J., Auer S. Neural network-based question answering over knowledge graphs on word and character level. *WWW'17: Proceedings of the 26<sup>th</sup> International Conference on World Wide Web*. 2017:1211-1220. <https://doi.org/10.1145/3038912.3052675>.
8. Xu B., Xu Y., Liang J., Xie C., Liang B., Cui W., et al. CN-DBpedia: a never-ending Chinese Knowledge extraction system. *Advances in Artificial Intelligence: From Theory to Practice*. 2017:428-438. [https://doi.org/10.1007/978-3-319-60045-1\\_44](https://doi.org/10.1007/978-3-319-60045-1_44).
9. Palumbo E., Rizzo G., Troncy R., Baralis E., Osella M., Ferro E. An empirical comparison of knowledge graph embeddings for item recommendation. *Istituzionale della Ricerca*. 2018. Available from: <https://iris.polito.it/retrieve/handle/11583/2710124/203256/paper2.pdf> [Accessed 28<sup>th</sup> February 2021].
10. Wang C., Yu H., Wan F. Information retrieval technology based on knowledge graph. *Proceedings of the 2018 3<sup>rd</sup> International Conference on Advances in Materials, Mechatronics and Civil Engineering (ICAMMCE 2018)*. 2018. <https://doi.org/10.2991/icammce-18.2018.65>.
11. Qi H., Dong S., Zhang L., Hu H., Fan J. Construction of Earth science knowledge graph and its future perspectives. *Geological Journal of China Universities*. 2020;26(1):2-10. (In Chinese). <https://doi.org/10.16108/j.issn1006-7493.2019099>.
12. Zhou Y., Zhang Q., Huang Y., Yang W., Xiao F. Construction of knowledge graph of porphyry copper deposit from Qingzhou Bay – Hangzhou Bay and insight into knowledge graph based mineral resource prediction and evaluation. *Earth Sciences Frontiers*. 2021;28(3):67-75. (In Chinese).
13. Liu Q., Li Y., Duan H., Liu Y., Qin Z. Knowledge graph construction techniques. *Journal of Computer Research and Development*. 2016;53(3):582-600. (In Chinese). <https://doi.org/10.7544/issn1000-1239.2016.20148228>.
14. Sahoo S., Halb W., Hellmann S., Idehen K., Thibodeau Jr T., Auer S., et al. A survey of current approaches for mapping of relational databases to RDF: W3C RDB2RDF Incubator Group report. *W3.org*. Available from: [https://www.w3.org/2005/Incubator/rdb2rdf/RDB2RDF\\_SurveyReport.pdf](https://www.w3.org/2005/Incubator/rdb2rdf/RDB2RDF_SurveyReport.pdf) [Accessed 28<sup>th</sup> February 2021].



15. Chen Y., Chen C., Liu Z., Hu Z., Wang X. The methodology function of CiteSpace mapping knowledge domains. *Studies in Science of Science*. 2015(2):243-252. (In Chinese). <https://doi.org/10.16192/j.cnki.1003-2053.2015.02.009>.

16. Knublauch H., Fergerson R. W., Noy N. F., Musen M. A. The Protégé OWL plugin: an open development environment for semantic web applications. *The Semantic Web – ISWC 2004*. 2004:229-243. <https://doi.org/>

10.1007/978-3-540-30475-3\_17.

17. Zhao P. Quantitative mineral prediction and deep mineral exploration. *Earth Science Frontiers*. 2007;14(5): 1-10. (In Chinese).

18. Agterberg F. *Geomathematics: theoretical foundations, applications and future developments*. Springer International Publishing; 2014. 553 p. Available from: <https://www.springer.com/gp/book/9783319068732> [Accessed 28<sup>th</sup> February 2021].

### Список источников

1. Zhang Q., Zhou Y. Big data helps geology develop rapidly // *Acta Petrologica Sinica*. 2018. Vol. 34. Iss. 11. P. 3167–3172.

2. Zhou Y., Wang J., Zuo R., Xiao F., Shen W., Wang S. Machine learning, deep learning and Python language // *Acta Petrologica Sinica*. 2018. Vol. 34. Iss. 11. P. 3173–3178.

3. Zhou Y., Zhang L., Zhang O., Wang J. Big data mining & machine learning in geoscience. Guangzhou: Sun Yat-sen University Press, 2018. 269 p.

4. Singhal A. Introducing the Knowledge Graph: things, not strings // Blog.google [Электронный ресурс]. URL: <https://www.blog.google/products/search/introducing-knowledge-graph-things-not/> (28.02.2021).

5. Wu W., Li H., Wang H., Zhu K. Q. Probbase: a probabilistic taxonomy for text understanding // *Proceedings of the 2012 ACM SIGMOD International Conference on Management of Data*. 2012. P. 481–492. <https://doi.org/10.1145/2213836.2213891>.

6. Hoffart J., Suchanek F. M., Berberich K., Weikum G. YAGO2: a spatially and temporally enhanced knowledge base from Wikipedia // *Artificial Intelligence*. 2013. Vol. 194. P. 28–61. <https://doi.org/10.1016/j.artint.2012.06.001>.

7. Lukovnikov D., Fischer A., Lehmann J., Auer S. Neural network-based question answering over knowledge graphs on word and character level // *WWW'17: Proceedings of the 26<sup>th</sup> International Conference on World Wide Web*. 2017. P. 1211–1220. <https://doi.org/10.1145/3038912.3052675>.

8. Xu B., Xu Y., Liang J., Xie C., Liang B., Cui W., et al. CN-DBpedia: a never-ending Chinese Knowledge extraction system // *Advances in Artificial Intelligence: From Theory to Practice*. 2017. P. 428–438. [https://doi.org/10.1007/978-3-319-60045-1\\_44](https://doi.org/10.1007/978-3-319-60045-1_44).

9. Palumbo E., Rizzo G., Troncy R., Baralis E., Osella M., Ferro E. An empirical comparison of knowledge graph embeddings for item recommendation // *Istituzionale della Ricerca*. 2018. [Электронный ресурс]. URL: <https://iris.polito.it/retrieve/handle/11583/2710124/203256/paper2.pdf> (28.02.2021).

10. Wang C., Yu H., Wan F. Information retrieval technology based on knowledge graph // *Proceedings of the*

2018 3<sup>rd</sup> International Conference on Advances in Materials, Mechatronics and Civil Engineering (ICAMMCE 2018). 2018. <https://doi.org/10.2991/icammce-18.2018.65>.

11. Qi H., Dong S., Zhang L., Hu H., Fan J. Construction of Earth science knowledge graph and its future perspectives // *Geological Journal of China Universities*. 2020. Vol. 26. Iss. 1. P. 2–10. <https://doi.org/10.16108/j.issn1006-7493.2019099>.

12. Zhou Y., Zhang Q., Huang Y., Yang W., Xiao F. Construction of knowledge graph of porphyry copper deposit from Qingzhou Bay – Hangzhou Bay and insight into knowledge graph based mineral resource prediction and evaluation // *Earth Sciences Frontiers*. 2021. Vol. 28. Iss. 3. P. 67–75.

13. Liu Q., Li Y., Duan H., Liu Y., Qin Z. Knowledge graph construction techniques // *Journal of Computer Research and Development*. 2016. Vol. 53. Iss. 3. P. 582–600. <https://doi.org/10.7544/issn1000-1239.2016.20148228>.

14. Sahoo S., Halb W., Hellmann S., Idehen K., Thibodeau Jr T., Auer S., et al. A survey of current approaches for mapping of relational databases to RDF: W3C RDB2RDF Incubator Group report // W3.org [Электронный ресурс]. URL: [https://www.w3.org/2005/Incubator/rdb2rdf/RDB2RDF\\_SurveyReport.pdf](https://www.w3.org/2005/Incubator/rdb2rdf/RDB2RDF_SurveyReport.pdf) (28.02.2021).

15. Chen Y., Chen C., Liu Z., Hu Z., Wang X. The methodology function of CiteSpace mapping knowledge domains // *Studies in Science of Science*. 2015. Vol. 2. P. 243–252. <https://doi.org/10.16192/j.cnki.1003-2053.2015.02.009>.

16. Knublauch H., Fergerson R.W., Noy N.F., Musen M.A. The Protégé OWL plugin: an open development environment for semantic web applications // *The Semantic Web – ISWC 2004*. 2004. P. 229–243. [https://doi.org/10.1007/978-3-540-30475-3\\_17](https://doi.org/10.1007/978-3-540-30475-3_17).

17. Zhao P. Quantitative mineral prediction and deep mineral exploration // *Earth Science Frontiers*. 2007. Vol. 14. Iss. 5. P. 1–10.

18. Agterberg F. *Geomathematics: theoretical foundations, applications and future developments*. Springer International Publishing, 2014. 553 p. [Электронный ресурс]. URL: <https://www.springer.com/gp/book/9783319068732> (28.02.2021).



## Information about the authors / Информация об авторах



**Yongzhang Zhou**, Professor & Director of the Center for Earth Environment & Resources of Sun Yat-sen University. He got his B. Sc. degree from Sun Yat-sen University (1982), M. Sc. from The Chinese Academy of Sciences (1987), Ph. D. from Québec Université, Canada (1992), and went to Stanford University as a visiting professor cooperating with Prof. John Harbaugh in 1996. He is the winner of the Felix Chayes Prize of the International Association for Mathematical Geosciences (2015) and the Excellent Teacher of National Education Ministry of China. He serves as the Chair of Big data and Mathematical Committee of China Society for Mineralogy, Petrology & Geochemistry, the Co-Chairman of the Topical Section of the IAMG for Chinese Members (IAMG-CN), the Chief-Advisor of IAMG Student Chapter at Sun Yat-sen

University (IAMG-SYSU). Included are in his research interests: big data mining, machine learning and mathematical geoscience; ore deposit-related or Environmental geochemistry.

**Юнчжан Чжоу** – профессор и директор Центр изучения окружающей среды и ресурсов университета им. Сунь Ятсена. Он получил степень бакалавра в университете Сунь Ятсена в 1982 году, степень магистра в Китайской академии наук в 1987-м, степень доктора философии в Квебекском университете Канады в 1992-м, работал в Стэнфордском университете в Калифорнии, США, в 1996 году в качестве приглашенного профессора, сотрудничая с профессором Джоном Харбо. Юнчжан Чжоу является лауреатом премии Феликса Чейса Международной ассоциации математических наук о Земле (2015) и заслуженным профессором Министерства национального образования Китая, председателем Комитета по большим данным и математике Китайского общества минералогии, нефти и геохимии, сопредседателем тематической секции IAMG (International Association for Mathematical Geosciences) для китайских членов (IAMG-CN), главным советником студенческого отделения IAMG в Университете им. Сунь Ятсена (IAMG-SYSU). В круг его научных интересов входят: интеллектуальный анализ больших данных, машинное обучение и математические науки о Земле; геохимия рудных месторождений и экологическая геохимия.

**Yongzhang Zhou,**

Dr. Sci. (Geol. & Mineral.), Professor,  
School of Earth Sciences & Geological Engineering,  
Center for Earth Environment & Resources,  
Sun Yat-sen University,  
Guangzhou, China,  
Guangdong Provincial Key Lab of Geological Processes and Mineral Resource Survey,  
Guangzhou, China,  
zhouyz@mail.sysu.edu.cn,  
<https://orcid.org/000-0002-8572-5849>.

**Чжоу Юнчжан,**

доктор геолого-минералогических наук, профессор,  
Школа геологических наук и геологического инжиниринга,  
Центр изучения окружающей среды и ресурсов,  
Университет им. Сунь Ятсена,  
г. Гуанчжоу, Китай,  
Центральная лаборатория службы геологических процессов и минеральных ресурсов провинции Гуандун,  
г. Гуанчжоу, Китай,  
zhouyz@mail.sysu.edu.cn,  
<https://orcid.org/000-0002-8572-5849>.

**Qianlong Zhang,**

School of Earth Sciences & Geological Engineering,  
Center for Earth Environment & Resources,  
Sun Yat-sen University,  
Guangzhou, China,  
Guangdong Provincial Key Lab of Geological Processes and Mineral Resource Survey,  
Guangzhou, China.

**Чжан Цяньлун,**

Школа геологических наук и геологического инжиниринга,  
Центр изучения окружающей среды и ресурсов,  
Университет им. Сунь Ятсена,  
г. Гуанчжоу, Китай,  
Центральная лаборатория службы геологических процессов и минеральных ресурсов провинции Гуандун,  
г. Гуанчжоу, Китай.



**Wenjie Shen,**

School of Earth Sciences & Geological Engineering,  
Center for Earth Environment & Resources,  
Sun Yat-sen University,  
Guangzhou, China,  
Guangdong Provincial Key Lab of Geological Processes and Mineral Resource Survey,  
Guangzhou, China.

**Шэнь Вэньцзе,**

Школа геологических наук и геологического инжиниринга,  
Центр изучения окружающей среды и ресурсов,  
Университет им. Сунь Ятсена,  
г. Гуанчжоу, Китай,  
Центральная лаборатория службы геологических процессов и минеральных ресурсов провинции Гуандун,  
г. Гуанчжоу, Китай.

**Fan Xiao,**

School of Earth Sciences & Geological Engineering,  
Center for Earth Environment & Resources,  
Sun Yat-sen University,  
Guangzhou, China,  
Guangdong Provincial Key Lab of Geological Processes and Mineral Resource Survey,  
Guangzhou, China.

**Сяо Фань,**

Школа геологических наук и геологического инжиниринга,  
Центр изучения окружающей среды и ресурсов,  
Университет им. Сунь Ятсена,  
г. Гуанчжоу, Китай,  
Центральная лаборатория службы геологических процессов и минеральных ресурсов провинции Гуандун,  
г. Гуанчжоу, Китай.

**Yanlong Zhang,**

Guangdong Institute of High Quality Resources and Environment,  
Guangzhou, China.

**Чжан Яньлун,**

Гуандунский институт высококачественных ресурсов и окружающей среды,  
г. Гуанчжоу, Китай.

**Shiwu Zhou,**

Guangdong Institute of High Quality Resources and Environment,  
Guangzhou, China.

**Чжоу Шиу,**

Гуандунский институт высококачественных ресурсов и окружающей среды,  
г. Гуанчжоу, Китай.

**Yongjian Huang,**

Guangdong Xuanyuan Network Tech. Inc.,  
Guangzhou, China.

**Хуан Юнцзянь,**

Компания Гуандун Сюаньюань Сеть и Технологии Инкорпорейтед,  
г. Гуанчжоу, Китай.

**Junjie Ji,**

School of Earth Sciences & Geological Engineering,  
Center for Earth Environment & Resources,  
Sun Yat-sen University,  
Guangzhou, China,  
Guangdong Provincial Key Lab of Geological Processes and Mineral Resource Survey,  
Guangzhou, China.

**Цзи Цзюньцзе,**

Школа геологических наук и геологического инжиниринга,  
Центр изучения окружающей среды и ресурсов,  
Университет им. Сунь Ятсена,  
г. Гуанчжоу, Китай,  
Центральная лаборатория службы геологических процессов и минеральных ресурсов провинции Гуандун,  
г. Гуанчжоу, Китай.

**Lei Tang,**

School of Earth Sciences & Geological Engineering,  
Center for Earth Environment & Resources,  
Sun Yat-sen University,  
Guangzhou, China,  
Guangdong Provincial Key Lab of Geological Processes and Mineral Resource Survey,  
Guangzhou, China.

**Тан Лэй,**

Школа геологических наук и геологического инжиниринга,  
Центр изучения окружающей среды и ресурсов,  
Университет им. Сунь Ятсена,  
г. Гуанчжоу, Китай,  
Центральная лаборатория службы геологических процессов и минеральных ресурсов провинции Гуандун,  
г. Гуанчжоу, Китай.

**Chong Ouyang,**

School of Earth Sciences & Geological Engineering,  
Center for Earth Environment & Resources,  
Sun Yat-sen University,  
Guangzhou, China,  
Guangdong Provincial Key Lab of Geological Processes and Mineral Resource Survey,  
Guangzhou, China.

**Оуян Чун,**

Школа геологических наук и геологического инжиниринга,  
Центр изучения окружающей среды и ресурсов,  
Университет им. Сунь Ятсена,  
г. Гуанчжоу, Китай,  
Центральная лаборатория службы геологических процессов и минеральных ресурсов провинции Гуандун,  
г. Гуанчжоу, Китай.

**Contribution of the authors / Вклад авторов**

The authors contributed equally to this article.

Все авторы сделали эквивалентный вклад в подготовку публикации.

**Conflict of interests / Конфликт интересов**

The authors declare no conflicts of interests.

Авторы заявляют об отсутствии конфликта интересов.

*The final manuscript has been read and approved by all the co-authors.*

*Все авторы прочитали и одобрили окончательный вариант рукописи.*

**Information about the article / Информация о статье**

The article was submitted 03.06.2021; approved after reviewing 08.07.2021; accepted for publication 10.08.2021.

Статья поступила в редакцию 03.06.2021; одобрена после рецензирования 08.07.2021; принята к публикации 10.08.2021.





В этом году исполнилось 90 лет выдающемуся геологу Китая, человеку, который в течение многих лет являлся ректором Китайского университета наук о Земле в Ухане и Пекине, академику Чжао Пэнда. Благодаря его поддержке более 30 лет назад началось совместное изучение континентальных рифтовых зон учеными Иркутского национального исследовательского технического университета и Китайского университета наук о Земле (г. Ухань). Эти исследования успешно продолжались более 20 лет. Редакционный совет журнала «Науки о Земле и недропользование» сердечно поздравляет академика Чжао Пэнда с юбилейной датой! Мы желаем ему еще долгих лет активной и плодотворной деятельности, здоровья и личного счастья! Ниже журнал публикует статью учеников академика Чжао Пэнда, посвященную его юбилею.

This year marks the 90<sup>th</sup> anniversary of the outstanding Chinese geologist, long-term rector of the China University of Geosciences in Wuhan and Beijing, Academician Zhao Pengda. Thanks to his support, more than 30 years ago, scientists from the Irkutsk National Research Technical University and the China University of Geosciences (Wuhan) began a joint study of continental rift zones. These studies have been successfully continued for over 20 years. The editorial board of the journal "Earth sciences and subsoil use" cordially congratulates Academician Zhao Pengda on his anniversary! We wish him many more years of active and fruitful work, health, and personal happiness! We wish him many more years of active and fruitful work, health, and personal happiness! Below the journal publishes an article by the students of Academician Zhao Pengda, dedicated to his anniversary.

Original article

<https://doi.org/10.21285/2686-9993-2021-44-3-219-242>



## Resource-environment joint forecasting using big data mining and 3D/4D modeling in Luanchuan mining district, China

Gongwen Wang<sup>a</sup>, Shouting Zhang<sup>b</sup>, Changhai Yan<sup>c</sup>, Zhenshan Pang<sup>d</sup>, Hongwei Wang<sup>e</sup>, Zhankui Feng<sup>f</sup>, Hong Dong<sup>g</sup>, Hongtao Cheng<sup>h</sup>, Yaqing He<sup>i</sup>, Ruixi Li<sup>j</sup>, Zhiqiang Zhang<sup>k</sup>, Leilei Huang<sup>l</sup>, Nana Guo<sup>m</sup>

<sup>a,b,j,l</sup>China University of Geosciences, Beijing, China

<sup>c</sup>Key Laboratory of Metallogenic Processes and Resource Utilization, Zhengzhou, China

<sup>d,k</sup>China Geological Survey, Beijing, China

<sup>e,m</sup>Luanchuan County Natural Resources Bureau, Luoyang, China

<sup>f</sup>Henan Jiuzhou Zhongding Mining Co., Ltd., Luoyang, China

<sup>g</sup>China Geology & Mining Co., Ltd., Beijing, China

<sup>h</sup>Henan Zhongxin Mining Co., Ltd., Luoyang, China

<sup>i</sup>Henan China Molybdenum Co., Ltd., Luoyang, China

Corresponding author: Gongwen Wang, gwwang@cugb.edu.cn

**Abstract.** The Fourth generation industrial age and 5G + intelligent communication in the "Fourth Paradigm of Science" in the 21<sup>st</sup> century provide a new opportunity for research on the relationship between mining development and environmental protection. This paper is based on the theory of metallogenic geodynamics background, metallogenic process and quantitative evaluation and chooses the Luanchuan district as a case study, using deep-level artificial intelligence mining and three/four-dimensional (3D/4D) multi-disciplinary, multi-parameter and multi-scale modeling technology platform of geoscience big data (including multi-dimensional and multi-scale geological, geophysical, geochemical, hyperspectral and high-resolution remote sensing (multi-temporal) and real-time mining data), carrying out the construction of 3D geological model, metallogenic process model and quantitative exploration model from district to deposit scales and the quantitative prediction and evaluation of the regional Mo polymetallic mineral resources, the aim is to realize the dynamic evaluation of high-precision 3D geological (rock, structure, hydrology, soil, etc.) environment protection and comprehensive development and utilization of mineral resources in digital and wisdom mines, it provides scientific information for the sustainable development of mineral resources and mine environment in the study area. The research results are summarized as follows: (1) The geoscience big data related to mineral resource prediction and evaluation of district include mining data such as

© Wang Gongwen, Zhang Shouting, Yan Changhai, Pang Zhenshan, Wang Hongwei, Feng Zhankui, Dong Hong, Cheng Hongtao, He Yaqing, Li Ruixi, Zhang Zhiqiang, Huang Leilei, Guo Nana, 2021



3D geological modeling, geophysics interpretation, geochemistry, and remote sensing modeling, which are combined with GeoCube3.0 software. The optimization of deep targets and comprehensive evaluation of mineral resources in Luanchuan district (500 km<sup>2</sup>, 2.5 km deep) have been realized, including 6.5 million tons of Mo, 1.5 million tons of W, and 5 million tons of Pb-Zn-Ag. (2) The 3D geological modeling of geology, mineral deposit, and exploration targeting is related to the mine environment. The data of exploration and mining in the pits of Nannihu – Sandaozhuang – Shangfang deposits and the deep channels of Luotuoshan and Xigou deposits show a poor spatial correlation between the NW-trending porphyry-skarn deposits and the ore bodies. The NE-trending faults are usually tensional or tensional-torsional structures formed in the post-metallogenic period, which is the migration pathway of hydrothermal fluid of the related Pb-Zn deposit. There is a risk of groundwater pollution in the high-altitude Pb-Zn mining zones, such as the Lengshui and Bailugou deposits controlled by NE-trending faults are developed outside of porphyry-skarn types of Mo (W) deposits in the Luanchuan area. (3) Construction of mineral resources and environmental assessment and decision-making in intelligent digital mines: 3D geological model is established in large mines and associated with ancient mining caves, pit, and deep roadway engineering in the mining areas to realize reasonable orientation and sustainable development of mining industry. The hyperspectral database is used to construct three-dimensional useful and harmful element models to realize the association of exploration, mining, and mineral processing mineralogy for the recovery of harmful elements (As, Sb, Hg, etc.). 0.5 m resolution Worldview2 images are used to identify the distribution of Fe in the wastewater and slag slurry of important tailings reservoirs, so as to protect surface runoff and soil pollution.

**Keywords:** geoscience big data, 3D/4D modeling, quantitative prediction and evaluation, resource and environment, intelligent mine, Luanchuan district

**Acknowledgements:** this year is Mr. Zhao Pengda's 90<sup>th</sup> birthday. We write this article to congratulate him! The first author's scientific research and teaching work in recent 20 years is closely related to the higher education postgraduate textbook "Quantitative Geoscience Methods and Applications" edited by Mr. Zhao (2004). In this textbook, "joint prediction and quantitative evaluation of resources and environment" is considered to be one of the frontier contents of quantitative geoscience research in the 21<sup>st</sup> century. During the research process, this paper was supported by Professor Clayton Deutsch (University of Alberta, Canada), Professor Cheng Lizhen (University of Quebec, Canada), Professor John Caranza (editor in chief of natural resources research), Professor Khan (University of Houston, USA), Professor Du Yangsong, Associate Professor Cao Yi and postdoctoral Du Jingguo; Thank academicians Mo Xuanxue, academicians Zhai Yusheng and academicians Zhao Pengda for their support; Thank Song Yaowu, Ma Zhenbo, Han Jiangwei, Wang Shiyan, He Yuliang, Guo Bo, Yun Hui, Peng Yi, Du Xin, Liu Guoyin, L. V. Wende, Li Zhongming and Zhang Gubin of Henan Geological Survey Institute for their support. The first author's graduate team has also given strong support in three-dimensional modeling, remote sensing interpretation, resource prediction, and evaluation, and metallogenic process analysis. I would like to express my sincere thanks. The paper was supported by the National Key R&D Program of China (No: 2017YFC0601204).

**For citation:** Wang Gongwen, Zhang Shouting, Yan Changhai, Pang Zhenshan, Wang Hongwei, Feng Zhankui, et al. Resource-environment joint forecasting using big data mining and 3D/4D modeling in Luanchuan mining district, China. *Nauki o Zemle i nedropol'zovanie = Earth sciences and subsoil use*. 2021;44(3):219-242. <https://doi.org/10.21285/2686-9993-2021-44-3-219-242>.

## Научная статья

УДК 550.8.053

# Совместное прогнозирование ресурсов и окружающей среды с использованием интеллектуального анализа больших данных и 3D/4D-моделирования в горнодобывающем районе Луаньчуань, Китай

Гунвэнь Ван<sup>a</sup>, Шоутин Чжан<sup>b</sup>, Чанхай Янь<sup>c</sup>, Чжэньшань Пан<sup>d</sup>, Хунвэй Ван<sup>e</sup>,  
Чжанькуй Фэн<sup>f</sup>, Хун Дун<sup>g</sup>, Хунтао Чэн<sup>h</sup>, Яцин Хэ<sup>i</sup>, Жуйси Ли<sup>j</sup>,  
Чжицян Чжан<sup>k</sup>, Лэйлэй Хуан<sup>l</sup>, Нана Го<sup>m</sup>

<sup>a,b,j,l</sup>Китайский университет наук о Земле, г. Пекин, Китай

<sup>c</sup>Центральная лаборатория металлогенических процессов и утилизации ресурсов, г. Чжэнчжоу, Китай

<sup>d,k</sup>Геологическая служба Китая, г. Пекин, Китай

<sup>e,m</sup>Бюро природных ресурсов уезда Луаньчуань, г. Лоян, Китай

<sup>f</sup>Хэнаньская горнодобывающая компания Цзычжоу Чжундин Майнинг Ко. Лимитед, г. Лоян, Китай

<sup>g</sup>Геологическая и горнодобывающая компания Китая, г. Пекин, Китай

<sup>h</sup>Хэнаньская горнодобывающая компания Чжунсинь Майнинг Ко. Лимитед, г. Лоян, Китай

<sup>i</sup>Хэнаньская компания Китая Молибден Лимитед, г. Лоян, Китай

Автор, ответственный за переписку: Ван Гунвэнь, gwwang@cugb.edu.cn



**Резюме.** Промышленная эра четвертого поколения и интеллектуальная связь 5G + в «четвертой парадигме науки» XXI века открывают новые возможности для исследований взаимосвязи между развитием горнодобывающей промышленности и защитой окружающей среды. Эта статья основана на теории металлогенической геодинамики, металлогенических процессах и количественной оценке на примере района Луаньчуань в качестве тематического исследования с использованием глубинного искусственного интеллекта и трехмерного / четырехмерного (3D/4D) междисциплинарного, многопрофильного параметрического и многомасштабного моделирования больших данных, включая многомасштабные геологические, геофизические, геохимические, гиперспектральные и высокоразрешающие данные дистанционного зондирования (разновременные), данные о добыче полезных ископаемых в реальном времени, с выполнением построения трехмерной геологической модели, модели металлогенического процесса и количественной модели разведки от локального района до масштабов месторождения, а также количественного прогнозирования и оценки региональных полиметаллических минеральных ресурсов Мо. Цель исследования заключается в реализации динамической оценки высокоточной трехмерной геологической модели (горные породы, структура, гидрология, почва и т. д.), охраны окружающей среды, комплексного освоения и использования минеральных ресурсов в цифровой среде. Исследование ориентировано на предоставление научной информации по устойчивому развитию минеральных ресурсов и горнодобывающей отрасли в изучаемом регионе. Результаты исследования заключаются в следующем. 1. Большие данные геонаук, связанные с прогнозированием и оценкой минеральных ресурсов в исследуемом районе, включают данные горных работ, такие как трехмерное геологическое моделирование, интерпретация геофизики, геохимия и моделирование дистанционного зондирования, которые объединены с программным обеспечением GeoCube3.0. Проведены оптимизация глубинных данных и комплексная оценка минеральных ресурсов в районе Луаньчуань (500 км<sup>2</sup>, глубина – 2,5 км), в том числе 6,5 млн тонн Мо, 1,5 млн т W и 5 млн т Pb-Zn-Ag. 2. Трехмерное геологическое моделирование геологии, месторождений полезных ископаемых и геологоразведочных работ связано с окружающей средой рудника. Данные разведки и добычи на карьерах месторождений Нанниху – Сандаочжуан – Шанфан и в глубоких руслах месторождений Луотуошань и Сигоу показывают слабую пространственную корреляцию между порфирово-скарновыми месторождениями северо-западного простирания и рудными телами. Разломы северо-восточного простирания обычно представляют собой структуры растяжения или растяжения-кручения, сформированные в пост-металлогенический период и являющиеся путями миграции гидротермального Pb-Zn флюида соответствующего месторождения. Существует риск загрязнения подземных вод в высокогорных зонах добычи Pb-Zn, таких как месторождения Ленгшуй и Байлугоу, контролируемых разломами северо-восточного простирания и разрабатывающихся за пределами месторождений порфирово-скарнового типа Мо (W) в районе Луаньчуань. 3. Моделирование минеральных ресурсов, оценка состояния окружающей среды и принятие решений в интеллектуальных цифровых рудниках: трехмерная геологическая модель создается на крупных рудниках и связана с древними горными пещерами, карьерами и глубокими дорожными сооружениями в районах добычи для обеспечения разумной ориентации и устойчивого развития горнодобывающей промышленности. Гиперспектральная база данных используется для построения трехмерных моделей полезных и вредных элементов с целью реализации взаимосвязи минералогии, разведки, добычи и переработки полезных ископаемых для извлечения вредных элементов (As, Sb, Hg и т. д.). Используются изображения Worldview2 с разрешением 0,5 м для определения распределения Fe в сточных водах и шламах важных хвостохранилищ, позволяющие защитить поверхностный сток и загрязнение почвы.

**Ключевые слова:** большие данные геонаук, 3D/4D-моделирование, количественный прогноз и оценка, ресурсы и окружающая среда, интеллектуальная добыча, район Луаньчуань

**Благодарности:** в этом году господину Чжао Пэнда исполняется 90 лет, и эта статья написана, чтобы поздравить его с юбилеем. Первые научные исследования и преподавательская деятельность автора за последние 20 лет были тесно связаны с учебником для аспирантов высших учебных заведений «Количественные методы геолого-геофизических наук и их применения» под редакцией господина Чжао (2004). В этом учебнике «совместное прогнозирование и количественная оценка ресурсов и окружающей среды» рассматриваются как одни из важнейших элементов содержания количественных геолого-геофизических исследований в XXI веке. Исследовательский процесс в рамках написания данной статьи поддержали профессор Клейтон Дойч (Университет Альберты, Канада), профессор Чэн Личжэнь (Университет Квебека, Канада), профессор Джон Карранза (главный редактор журнала Natural Resources Research), профессор Хан (Университет Хьюстона, США), профессор Ду Янсун, доцент Цао И и докторант Ду Цзинго. Также благодарю академика Мо Сюаньсюе, академика Чжай Юйшэн и академика Чжао Пэнда за поддержку. Благодарю Сун Яоу, Ма Чжэньбо, Хань Цзяньвэй, Ван Шиянь, Хэ Юйлян, Го Бо, Юнь Хуй, Пэн И, Ду Синь, Лю Гоинь, Л. В. Венде, Ли Чжунмин и Чжан Губинь из Хэнаньского института геологической службы за их поддержку. Команда выпускников первого автора также оказала значительную помощь и поддержку в трехмерном моделировании, интерпретации данных дистанционного зондирования, прогнозировании и оценке ресурсов, а также в анализе металлогенических процессов. Хочу им выразить свою искреннюю благодарность. Работа была выполнена при поддержке Национальной программы ключевых исследований и разработок Китая (№ 2017YFC0601204).

**Для цитирования:** Ван Гунвэнь, Чжан Шоутин, Янь Чанхай, Пан Чжэньшань, Ван Хунвэй, Фэн Чжанькуй [и др.]. Совместное прогнозирование ресурсов и окружающей среды с использованием интеллектуального анализа больших данных и 3D/4D-моделирования в горнодобывающем районе Луаньчуань, Китай // Науки о Земле и недропользование. 2021. Т. 44. № 3. С. 219–242. <https://doi.org/10.21285/2686-9993-2021-44-3-219-242>.



## Introduction

In the 21<sup>st</sup> century, the intelligence and intelligent manufacturing of the fourth generation industry age promoted the rapid development of new engineering innovation, 5G + communication, cloud computing, and other real-time intelligent decision-making, provided scientific and technological support for the Fourth Paradigm of Science (Data-Intensive Scientific Discovery)<sup>1</sup>, and also provided a new opportunity for comprehensive research on mining development and environmental protection. The geoscience system research of lithosphere, biosphere, hydrosphere, and atmosphere becomes the core content and frontier field.

Zhao put forward that the exploration and development of mineral resources in the 21<sup>st</sup> century must achieve the unity of social, economic, and environmental benefits [1], which require the joint evaluation of mineral resources and environment, and the combination of mineral mapping and mineral exploration. Since 2011, 117 key districts in 16 regional metallogenic belts in China were implemented to deep (less than 1000 m) mineral exploration based on the 1:50000 geological mapping. A series of metallogenic theories and technologies were constructed, for example, Ye et al. [2] built theory and method of prospecting prediction in mineral exploration zone, and the ore-forming dynamic background, process, and quantitative evaluation of large and super-large deposits [3–5]. The 13<sup>th</sup> five-year national key research and development plan "deep resources exploration and exploitation" has promoted the deep (less than 3000 m) resource prospecting, prediction, and evaluation of key districts in China [6–15].

Most European countries and the United States have established the "industry and university" research alliance of geosciences using the interdisciplinary 3D/4D modeling. The alliance proposed 3D/4D modeling and artificial intelligence technology as the basis of mineral exploration and extraction of geoscience information in recent years [16–20]. For example, OneGeology team developed the 3D geoscience modeling using artificial intelligence and big data with Loop

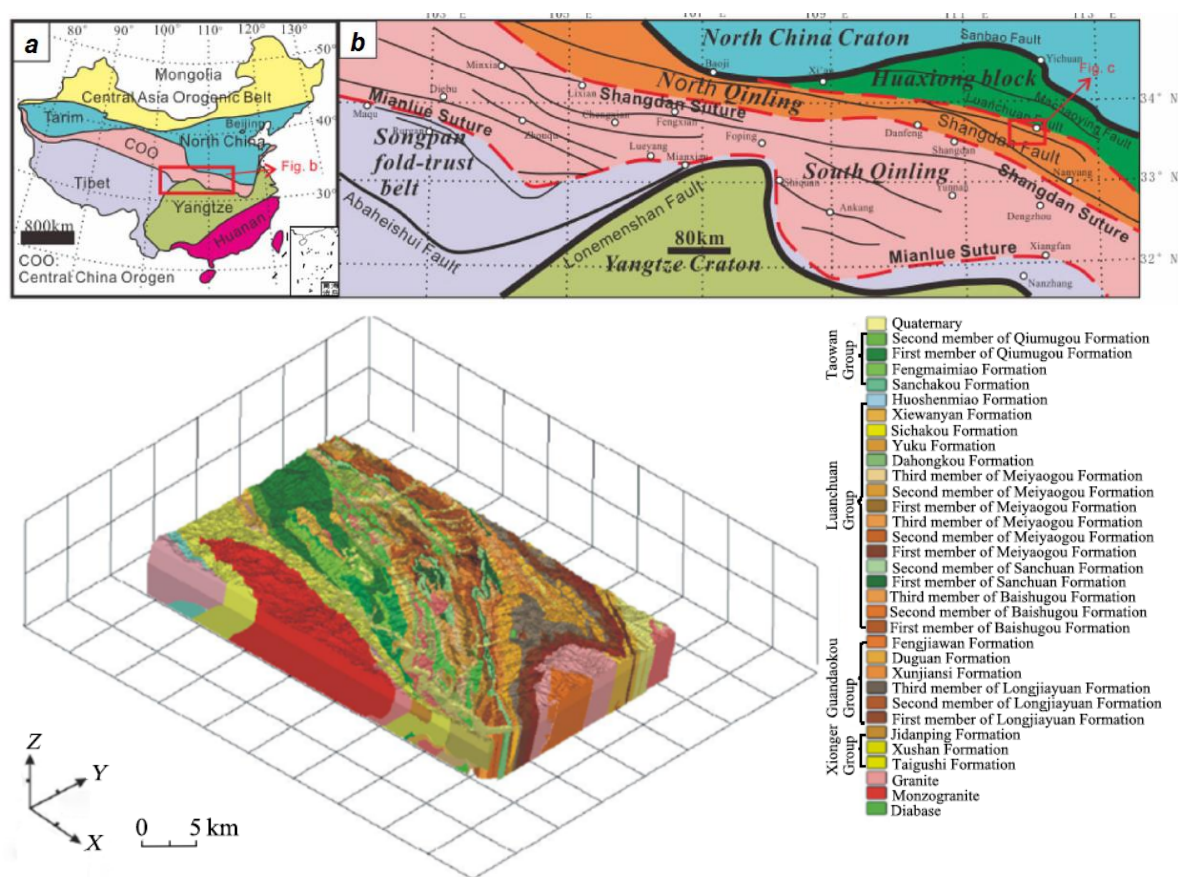
3D methodology (RFG, 2018). Australia developed the GlassEarth (1998), Uncover (2006) and BigEarth (2018) plans to explore 1000 m, 3500 m and 10000 m potential mineral deposits in deep, respectively, and the Loop3D technology is developed as the future 3D/4D geoscience modeling platform. The United States Geology Survey made 2013-2023 deep exploration plan to construct 3D/4D geological modeling for the resources and environment protection in USA. Mira Geoscience international mining company developed 4D wisdom management platform with the combination of 3D exploration and big data for the real-time-mining. Geological Cloud 3.0 developed by China Geology Survey can build real-time and multi-scale (region, district, camp, deposit) geological mapping and the 3D borehole, orebody and mining modeling. Based on the metallogenic system and mineral system theories, 3D/4D modeling has been used to construct an exploration model of mineral deposits [13, 14].

The aim of this study is to realize the dynamic evaluation of high-precision 3D geological (rock, structure, stratum, and orebody) modeling and environment protection, and enhance the comprehensive development and utilization of mineral resources in digital and intelligent mines using geoscience big data, geodynamic background, metallogenic process and quantitative evaluation of large and super-large deposits [21–30]. The result provides a scientific basis for the sustainable development of mineral resources and mine environment in the study area.

## Geological setting and deposit features

The Luanchuan district (25 km × 20 km × 2.5 km (depth) in 3D space) is located in the northeastern part of the Qinling Orogen Belt. The Qinling Orogenic Belt extends for more than 2,200 km in NW-trending distribution and separates the North China Craton from the South China Craton (Fig. 1). The main strata exposed in the study area include the Neoproterozoic Luanchuan Group and the Taowan Group, the Mesoproterozoic Guandaokou Group, and the Neoproterozoic Kuanping Group from the north to

<sup>1</sup> Gray J., Szalay A. *A transformed scientific method: technical report*. Mountain View: National Research Council – Computer Science and Telecommunications Board; 2007.



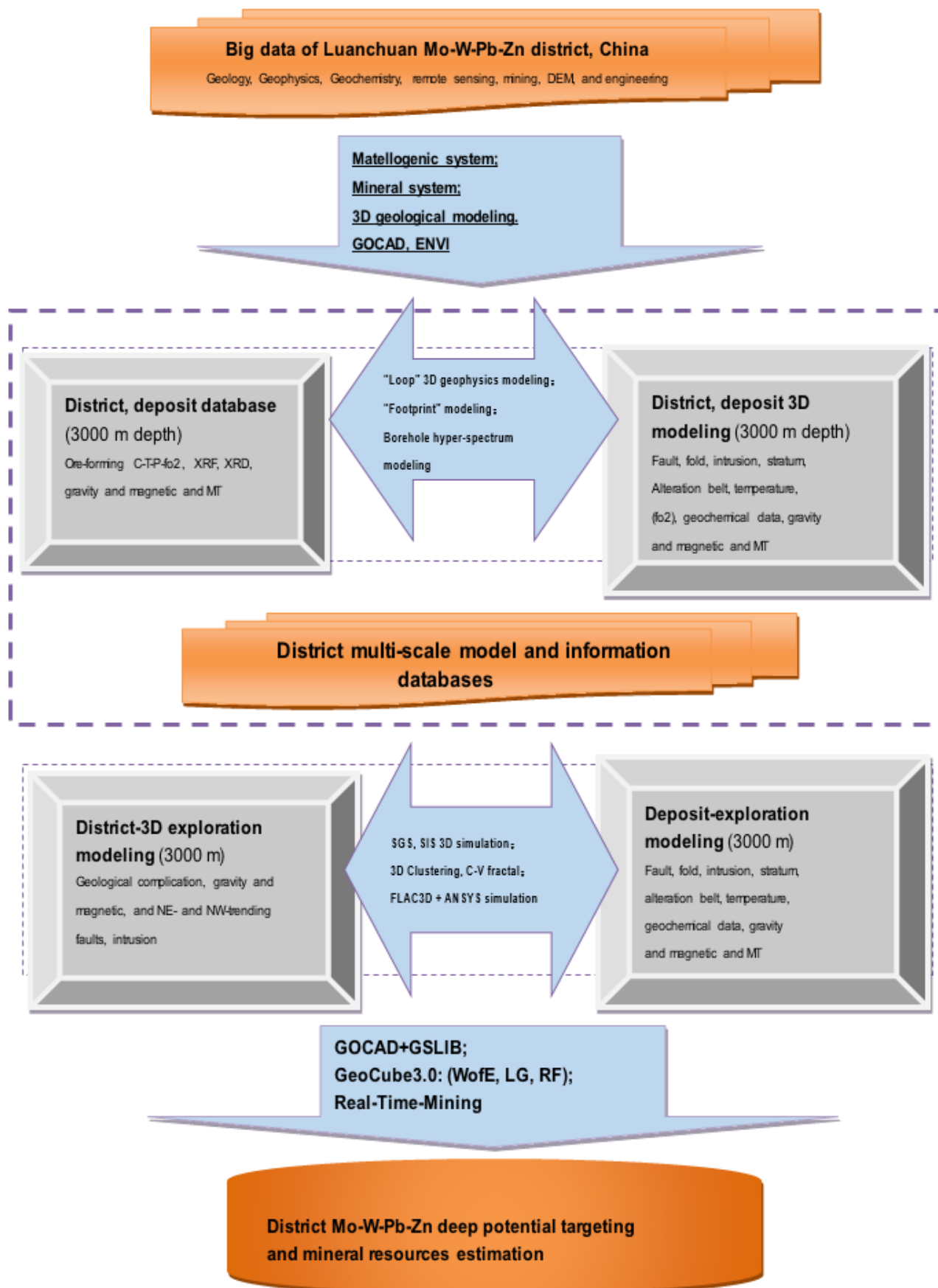
**Fig. 1. 3D geological model of the Luanchuan district**  
**Рис. 1. Геологическая 3D-модель района Луаньчуань**

south [21, 22]. The Luanchuan Group as the main hosting stratum for ore body has a thickness of ~3100 m and consists of carbonate-clastic rocks formed in a shallow-marine environment, of which ~2,050 m (Sanchuan (Pt3S), Nannihu (Pt3N), Meiyaogou (Pt3M) and Yuku (Pt3Y) Formations from the bottom upwards) is associated with Mo and Pb-Zn-Ag-Au mineralization (Fig. 2). The regional structures in the Luanchuan district define a network of NW- and NE-trending faults. The Luanchuan Group is in a faulted contact with or unconformably overlain by the Taowan Group. The Luanchuan and Zhuyuangou faults constitute the boundaries of the tectonic framework of the Mo deposits. The intersections of the NE- and NW- trending faults control the intrusions and spatial distribution of small acidic-intermediate plutons and are the structures controlling the vein-type Pb-Zn-Ag deposits. During the Jurassic, small-scale granitic stocks, dikes, and breccia pipes were formed, whereas, during the Cretaceous, large-scale batholiths were developed [6]. The plutonic rocks in the Luanchuan district consist of Late Proterozoic syenite and Jurassic

granite. The latter one consists of either massive / extensive granite batholith or stocks / dikes of granite porphyry, and they are known to be associated with Mo-W-Pb-Zn mineralization in the study area.

There are five large Mo polymetallic deposits and more than 20 small / medium Pb-Zn deposits in the study area (Table), and all the large Mo polymetallic deposits are hosted by the Luanchuan Group. The molybdenite Re-Os and sphalerite Rb-Sr isotopic dating showed Mo and Pb-Zn mineralization occurred at ~145 Ma and ~139 Ma, respectively [6, 20]. Most of the hydrothermal vein-type Pb-Zn deposits in the district have a close Spatio-temporal relationship with the porphyry-skarn deposits. All Jurassic granitic stocks, including those host the Mo-W mineralization at Nannihu, Shangfanggou, Shibaogou, and the Huangbeiling, are shallow-level and consist of granodiorite, monzogranite, and granite porphyry stocks which are correlated to one batholith at the depth [27]. The magmatic evolution from granodiorite to monzogranite and to granite porphyry reflects an increase in silica and alkalis,





**Fig. 2. The workflow of 3D targeting and mineral resources calculation in the study area**  
**Рис. 2. Рабочий процесс 3D-целеполагания и подсчета запасов полезных ископаемых на исследуемой территории**



**Optimization of main targets of Mo and Pb-Zn mining zones in Luanchuan district based on GeoCube software integration**

**Оптимизация основных целей зон добычи Мо и Pb-Zn в районе Луаньчуань на основе интеграции программного обеспечения GeoCube**

Target	Number	Target	Location (X, Y, Z)	Target delineation	Minerals	Mineral resources (reserve) 10 <sup>4</sup> t
A	A1	Daping	553400,3748700,1040	The surrounding area of Daping rock mass is a shallow concealed section, and the ore is predicted to be found 100 m below the surface. The exposed rock mass and Mo polymetallic ore vein on the surface have strong alteration, developed fault structures and folds, and obvious geophysical anomalies. Estimation domain: porphyry skarn Mo and hydrothermal vein Pb Zn deposits	Pb-Zn, Mo	Mo 30 Pb-Zn 120
	A2	Niandaogou	549100,3751300,920	The northeast of shibaogou rock mass is a shallow concealed section. It is predicted that ore can be found 200 m below the surface. There are concealed rock mass (lying on the north side of shibaogou rock mass). The NE trending structure has significant ore control and geophysical anomaly. Estimation domain: hydrothermal vein Pb Zn deposit	Pb-Zn, Mo	Mo 30 Pb-Zn 110
	A3	Zhazigou1	547500,3750400,1100	The northwest of shibaogou rock mass is a shallow concealed section. It is predicted that ore can be found 200m below the surface, and there are concealed rock mass (shibaogou rock mass is NE trending laterally). The NE trending structure controls the ore significantly, and the geophysical anomaly is obvious. Estimation domain: hydrothermal vein Pb Zn deposit	Pb-Zn, Mo	Mo 40 Pb-Zn 120
	A4	Danangou	542200,3753000,1340	The southwest of the ore type Shang-fang is a concealed ore section. The predicted target area is as deep as 500 m above sea level, with concealed rock mass. The NE trending structure controls the ore significantly, and the geophysical anomaly is obvious. Estimation domain: porphyry skarn Mo and hydrothermal vein Pb Zn deposits	Pb-Zn, Mo	Mo 10 Pb-Zn 100
	A5	Lengshui West	541300,3758300,920	There is a concealed ore section in the west of Lengshui. The predicted target area is as deep as 600 m above sea level, with concealed rock mass, significant ne structural ore control and obvious geophysical anomaly. Estimation domain: porphyry skarn Mo and hydrothermal vein Pb Zn deposits	Pb-Zn, Mo	Mo 10 Pb-Zn 100



	A6	Huoshenmiao East	532400,375750,560	The east of huoshenmiao is a concealed ore section. The predicted target area is below 300 m above sea level, with concealed medium acid rock mass and basic rock mass distributed, with obvious geophysical anomaly. Estimation domain: porphyry skarn Mo and hydrothermal vein Pb Zn deposits	Pb-Zn, Mo	Mo 30 Pb-Zn 110
	A7	Yuku North	544900,3749400,860	The north of Dongyu reservoir is a shallow concealed section. It is predicted that ore can be found 200 m below the surface of the target area, with concealed medium acid rock mass and basic rock mass distributed, with obvious geophysical anomaly. Estimation domain: porphyry skarn Mo and hydrothermal vein Pb Zn deposits	Pb-Zn, Mo	Mo 40 Pb-Zn 100
B	B1	Huangbeiling West	540990,3750800,1250	The West and northwest of Huangbeiling are Pb Zn prediction prospecting targets, and there is no prospect in the northwest. Concealed rock bodies are distributed, and geophysical anomalies are obvious. Estimation domain: porphyry skarn Mo ore and hydrothermal vein Pb Zn ore	Pb-Zn, Mo	Mo 40 Pb-Zn 80
	B2	Hongdonggou EastSouth	539800,3747400,1100	The southeast of hongdonggou is a Pb Zn prospecting target area. The characteristics of structural ore control are obvious; Small acid rock bodies are distributed in taowan group, with obvious geophysical anomalies. Estimation domain: hydrothermal vein Pb Zn deposit	Pb-Zn	Pb-Zn 70
	B3	Baishadong EastSouth	554500,3755300,980	The southeast of baishadong is a Pb Zn prospecting target area. NW and NE trending structures have significant ore control characteristics; The strata of the exposed pipeline mouth group may have Yanshanian rock mass or dyke in the deep, and the geophysical anomaly is obvious. Estimation domain: hydrothermal vein Pb Zn deposit	Pb-Zn	Pb-Zn 60

accompanied by increasing Mo-W and decreasing mafic components. The outcropping Nannihu granite porphyry stock covers about 0.12 km<sup>2</sup> at the surface, with porphyritic monzogranite at shallow levels. The types of hydrothermal alteration at the Nannihu deposit include: (1) potassic alteration, with biotite and feldspar as predominant hydrothermal minerals; (2) silicification is widespread in the porphyry and wall rocks and particularly associated with the quartz-(sulfide) stockworks or veinlets; (3) sericitization is formed

by replacement of feldspar and biotite to sericite, with disseminated pyrite and quartz-sericite veinlets; and (4) carbonation is associated with replacement of mafic minerals by carbonates. However, it is magnesian skarn in Shangfang Mo-W-Fe deposit with the mining engineering discovery in recent years, the early stage is associated with porphyry mineralization, and the serpentine, talc and phlogopite are the main secondary which affected the metallurgy process especially the Mo rate of recovery in digital mines. Therefore, the



complex skarn mineral system needs high-precise 3D multiple minerals modeling to support the digital and intelligence mines in the study area.

### Methodology

The methodology of geoscience big data in the study area is related to mineral resource prediction and evaluation [31–52], including 3D geological modeling, forward calculation, and constrained inversion of the 3D geophysics interpretation using the geological model and metallogenic model with Loop 3D methods, geochemistry, and remote sensing interpretation, etc., combined with self-developed GeoCube3.0 software with seven integration methods [6, 14].

The procedures for 3D modeling and integration of spatial features for generation of exploration targets involved four stages: (1) 3D geological modeling for understanding the district-scale ore-forming geological bodies; (2) 3D modeling of large Mo-W-Pb-Zn deposits for understanding metallogenic model; (3) 3D modeling and extraction of exploration criteria representing potential targeting using big data of geoscience datasets, such as (a) gravity and magnetic features, (b) Jurassic mineralized granite porphyry stocks, (c) NW- and NE- trending ore-controlling faults and (d) Luanchuan Group ore-controlling strata; and finally (4) integration of features representing exploration criteria using boost weights-of-evidence (boost WofE).

**Geosciences Datasets.** 3D geological models of the Luanchuan district (25.0 km × 20.0 km × 2.5 km) were constructed from geoscience datasets with a uniform geological coding system (Fig. 1). The geoscience data comprise nine geological cross-sections, a 1:10,000 scale geological and topographic map, 1:25000 gravity and magnetic interpretation, and AMT and CSAMT sections [21, 23, 24], 1500 boreholes (the maximum depth is 1832 m) with 36,000 geochemical data and 937 hand specimens at the subsurface (channel), and 9,870 surface geophysical survey points (gravity, magnetic, and topographic).

The 3D study area measures 25 km in the E-W direction and 20 km in the N-S direction, and the elevation range of the borehole and geophysical datasets varies from 1500 m to -1000 m. The Micromine, ArcGIS, MapGIS, AutoCAD, Aess, GOCAD, and self-development

GeoCube2.0 were used to implement the geoscience datasets. The methodology was delineated by Figs. 3 and 4.

**3D modeling of deposits and geological model.** The Nannihu, Sandaozhuang, and Shangfang deposits are the largest porphyry-skarn Mo deposits in the Luanchuan district. These deposits have been explored to depths of more than 900 m. The Mo reserves for each of them are about 700,000 t (the depth is 1500 m). Therefore, 3D modeling of Mo deposits in the district is very important for the analysis of the spatial correlations with geological and metallogenic features, e. g., optimum 3D space distance of spatial correlation between Jurassic granite porphyry stocks and large Mo deposits.

The 3D explicit modeling is used to construct the geological model with borehole, channel, and cross-section datasets, and 3D explicit modeling is used to construct the alteration and grade models with GOCAD 18.0 software (Fig. 5).

**Integration of exploration criteria and potential targeting.** The integration of exploration criteria in the study area is implemented by combining the exploration model and feasible exploration criteria in 3D space (the depth is 3000 m).

The boost WofE method was used to integrate exploration criteria (metallogenic information of metallogenic model) for identification of potential Mo polymetallic targets with GeoCube 2.0 software [23]. The uncertainty of deep potential targets was analyzed by gravity and magnetic and MT image joint modeling.

**Uncertainty analysis of 3D geological modeling and targeting.** The 3D geological modeling and mapping have several uncertainties including the multiple scale geological boundary and geometry in 3D space. In this paper, the following uncertainty analyses were delineated:

(1) The Flac3D simulation was used to construct the uncertainty of ore-bearing and ore-controlling geological bodies including the porphyry stocks and NW-trending faults (Fig. 6, a).

(2) The experimental metallogenic dynamic laboratory was implemented to quantify the vertical and horizontal parameters (dip, width, strike, etc.) of the thrust nappe structure in the Luanchuan district (Fig. 6, b).

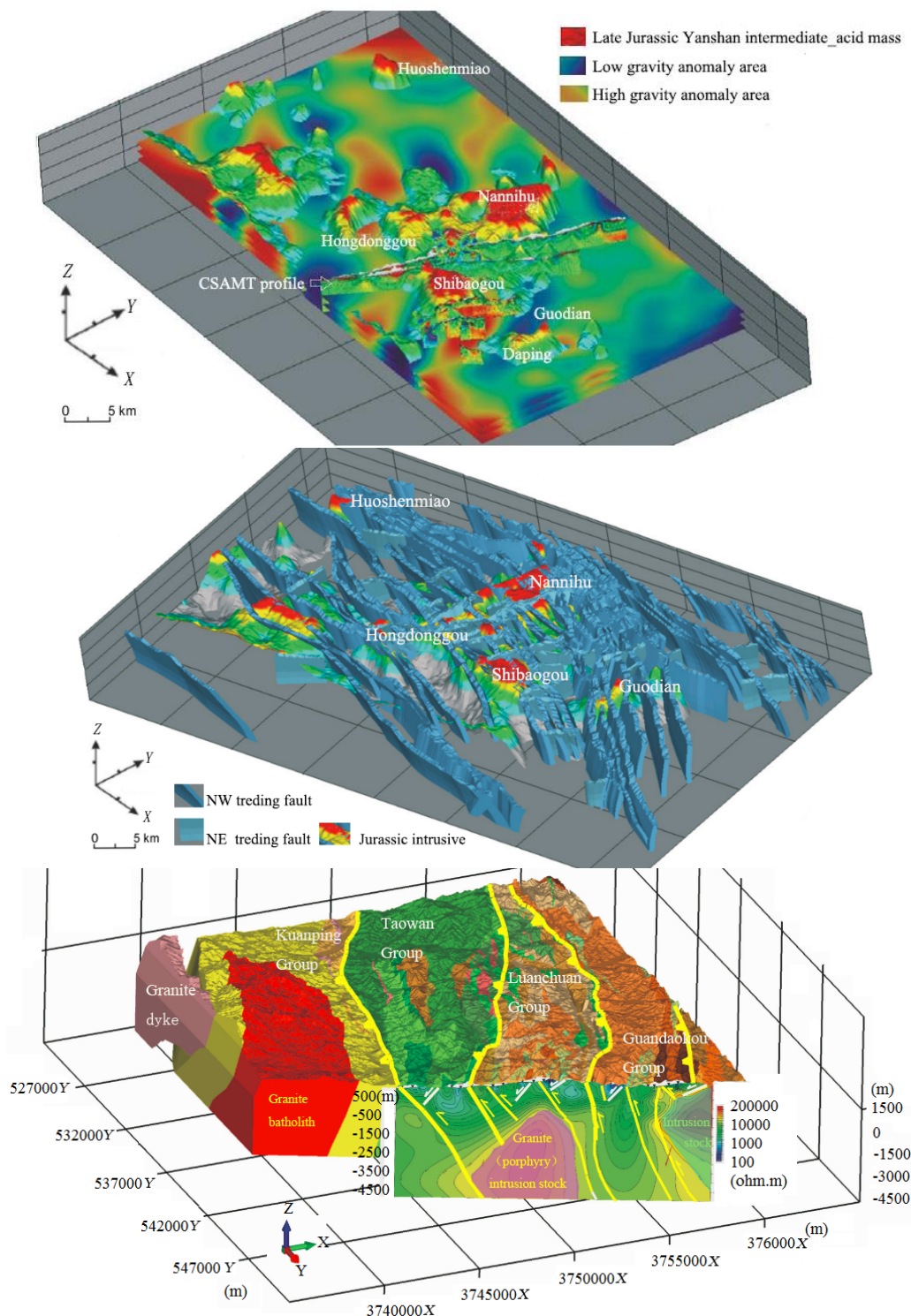
(3) The potential targeting was interpreted by the key exploration criteria using metallogenic





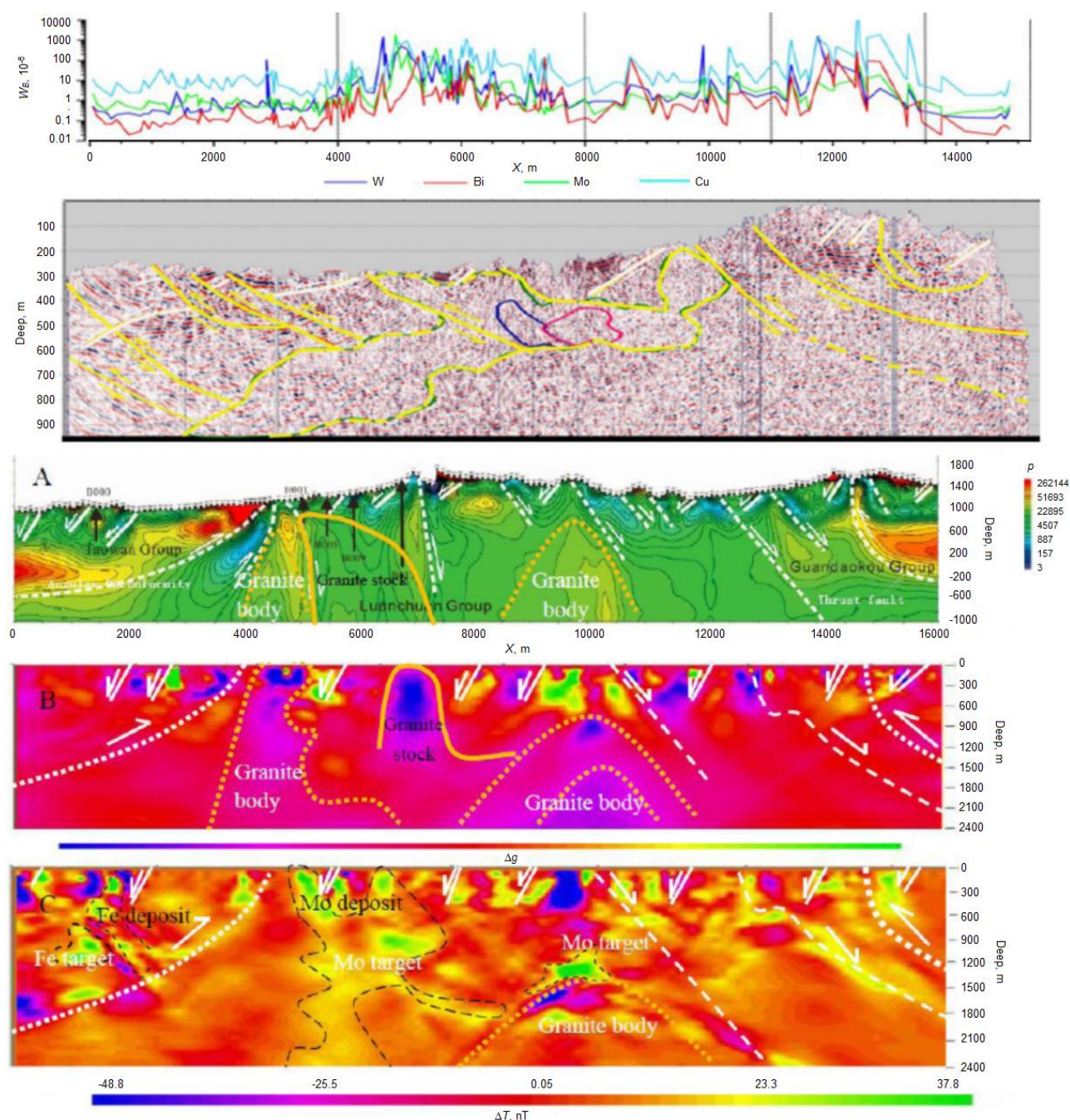
and exploration models and mineral systems. The A-type targets generally include known Mo-W deposits and several Pb-Zn deposits with almost exploration criteria; the B-type targets generally include few Pb-Zn deposits with main exploration criteria. The deep targets are supported

by the multiple parameters of geophysics and concealed porphyry stocks and near NW- trending faults. Therefore, the geological and metallogenic genesis exploration criteria in this paper are associated with the mineral systems of Mo-W-Pb-Zn deposits in the study area.



**Fig. 3. The geological and geophysical datasets and 3D modeling using Loop joint interpretation [15]**

**Рис. 3. Наборы геолого-геофизических данных и 3D-моделирование с использованием совместной интерпретации Loop [15]**

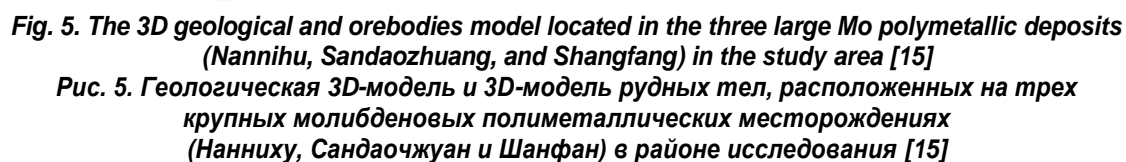


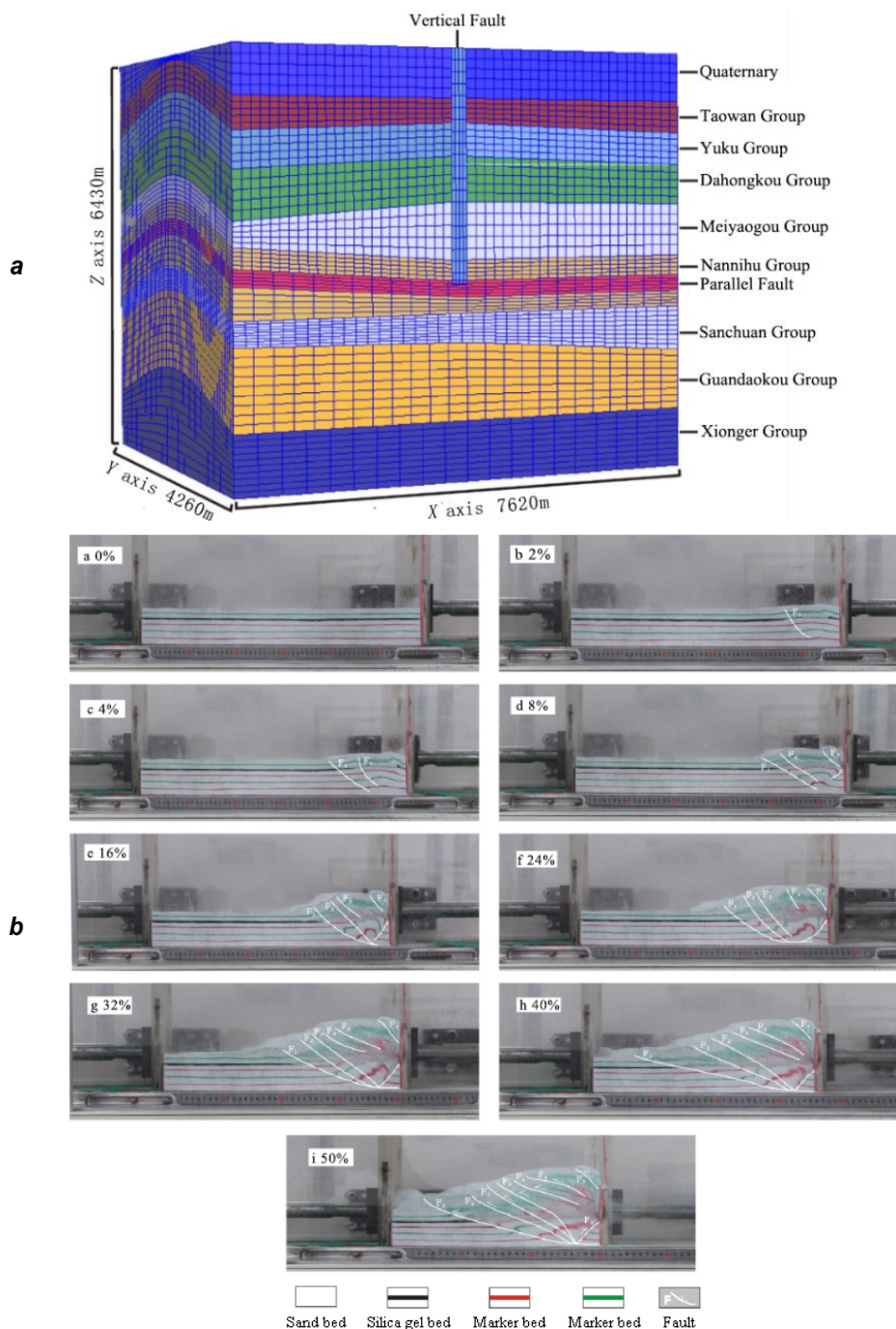
**Fig. 4. The geochemical and geophysical datasets to identify key metallogenic bodies in multiple exploration zones**  
**Рис. 4. Наборы геохимических и геофизических данных для определения ключевых металлогенических тел в нескольких зонах разведки**

*The mine environment evaluation.* The mine environment correlated with the geological setting, mining development including three large Mo-W pits and Pb-Zn subsurface channels, and >200 tailings ponds in the study area (Fig. 7). There are four main factors related to mine environmental assessment, which are summarized as geological environment background, mining development, mine geological environment problems, and geological disasters. The geological

environment includes structural geology (such as complex structure, strong fault structure development, and joint development), hydrogeology and engineering geology; the mine geological environment problems include aquifer damage, water pollution, and soil pollution; the mine density, open stope area, slope and waste rock treatment of mining development [53–55]; The frequency of secondary disasters in geological disasters is related to the above three.







**Fig. 6. The 3D simulation using the Flac3D platform and experimental metallogenic dynamic laboratory to analyze the 3D metallogenic model in the study area**

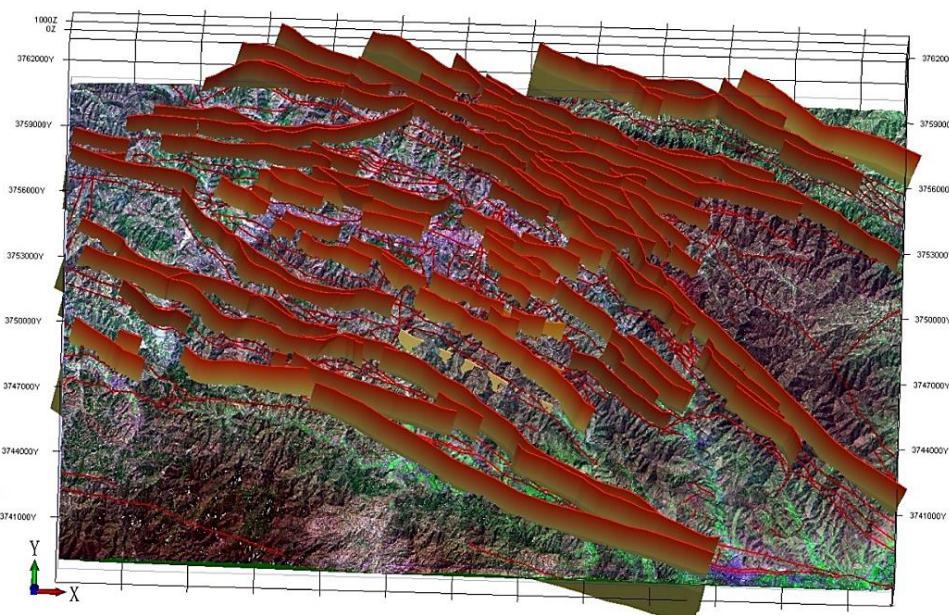
**Рис. 6. Трехмерное моделирование с использованием платформы Flac3D и экспериментальной металлогенической динамической лаборатории для анализа трехмерной металлогенической модели в районе исследования**

In terms of mine environment assessment, remote sensing multi-temporal high-resolution and hyperspectral technology and GIS remote sensing monitoring of mine geological environment, Beidou global positioning system and GPS associated mine micro-seismic monitoring, real-time radar pit, and land subsidence dynamic monitoring, and UAV multi-stage geophysical multi-

parameter dynamic monitoring has been demonstrated in mines of the study area.

The mine geological environment in the Luan-chuan ore concentration area has serious environmental problems before 2010. The ore fields in the Sandaozhuang, Nannihu, and Shangfang Mo-W deposits, the Luotuoshan polymetallic deposits, and Lengshuibegou lead-zinc deposit are





**Fig. 7. The 3D NW-trending ore-controlling faults model with different dips and overlay the remote sensing image in the study area**

**Рис. 7. 3D-модель рудоконтролирующих разломов северо-западного простирания с разными углами наклона, наложенная на изображение дистанционного зондирования в районе исследования**

too centralized, resulting in serious groundwater pollution of the Lengshui Town, extensive coverage of soil dust, and even a microclimate of local mineral dust haze in the open stope [56]. Chitudian Pb-Zn deposit is widely distributed, with hundreds of stolen mining holes, and the current situation of historical problems is worrying. After decades of underground disorderly mining in the early years, a large number of extremely complex underground mining caves had been formed under the Sandaozhuang pit. At present, Luanchuan district has 5 five large and medium-sized tailing ponds associated with Mo (W) mines (Fig. 8), more than 100 small and medium-sized polymetallic tailing ponds, and more than 20 deposits undermining. Therefore, the environmental assessment of mining development needs real-time supervision and even 4D control of digital and green and wisdom mines.

According to the characteristics of high mining density and wide distribution of tailing ponds in the study area, the iron alteration of the Nannihu camp with 0.5 m resolution of Worldview2 image is extracted by using remote sensing geoscience Envi5.4 software. Among them, large tailing ponds and open stope generally contain iron contamination (Fig. 8). It can be seen from the images of tailing ponds associated with Sandaozhuang, Nannihu, and Shangfang Mo-W

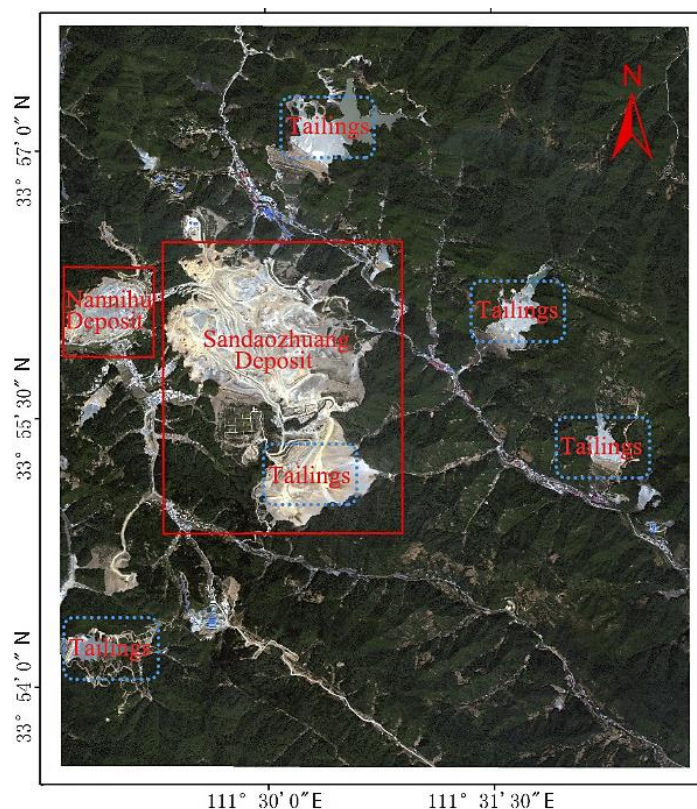
deposits (Fig. 8) that the tailing ponds with abnormal iron pollution have secondary utilization space. In view of the system that needs to increase the minimum beneficiation index of tailings, restrict the diffusion of harmful elements (water and dust) that are soluble in water such as Sb and Hg in multiple ways.

In order to avoid water and dust pollution, closed beneficiation technology and wastewater recycling technology provide technical guarantees for the construction of green mines. The fourth generation of industrial reform and innovation of Luoyang Mo mining group leads and has a number of green beneficiation technology patents, which has preliminarily realized the environmental protection and treatment of mine dust.

## Results

The optimization of deep targets and evaluation of mineral resources in Luanchuan district (500 km<sup>2</sup>, 2.5 km deep) have been realized as the following aspects:

(1) The Luanchuan Mo polymetallic district has 6.5 million tons of Mo, 1.5 million tons of W, and 5 million tons of Pb-Zn-Ag using the big data integration 3D targeting (the depth is 2500 m) with boreholes dataset and channel engineering dataset, geophysical and geochemical datasets (Fig. 9, Table).



**Fig. 8. The Worldview 2 images (0.5 m resolution) in the main deposit zones**  
**Рис. 8. Снимки Worldview 2 (разрешение 0,5 м) в основных зонах месторождения**

(2) The mining of subsurface moderate and small Pb-Zn deposits generally affects the surface and subsurface water pollution where secondary NE-trending faults exist, but the large Mo-W deposits with pit mining have little effect on the environment which have a series of geological protection, mining monitoring, and real-time control of geological disasters. The regional NW-trending compression torsion structures have stable geological body features including large nappe structure framework, batholith, and stocks development, but the NE-trending faults have active and tensional features (Figs. 10 and 11).

(3) The NW-trending and NE-trending faults are key factors to control the Mo-W mining pits and subsurface Pb-Zn mines in the study area, and the late NE-trending faults related to mineralization can lead to the subsurface water pollution in the Pb-Zn deposits which are near to the Mo-W porphyry-skarn deposits.

(4) Figure 10 shows the intelligent control of digital mine obtained by tailings pond in Chitudian town. Deep mining serves the sustainable development of mining enterprises through accurate 3D ore body modeling and accurate roadway

design (Fig. 10), and green mining technology promotes the rational development and utilization of tailings ponds.

## Conclusions

(1) Geoscience big data and artificial intelligence technology provide an opportunity for the development of new theories, technologies, and methods of earth observation and information extraction, promote the development of geoscience theories and methods from qualitative description to quantification, visualization, simulation analysis, virtual reality, and even artificial intelligence, and become one of the effective ways for the joint evaluation of mining development and environment. It provides scientific and technical support for the construction of "green mine, digital mine and smart mine" of "real-time mining". The Luan-chuan geoscience big data used in this paper relates the research contents of two first-class disciplines: geology, geological resources, and geological engineering, covering geology, deposit, exploration, hydrology, engineering, mining, beneficiation, mine safety, and other disciplines. Its multi-temporal remote sensing images, dynamic mining information, hydrological environment



monitoring, and other monitoring have the dynamic characteristics of big data.

(2) Using three-dimensional visualization technology and mathematical modeling method,

this paper analyzes the genetic model of deposit scale correlation ore field and even ore concentration area scale and constructs three-dimensional exploration variables, including: (a) use

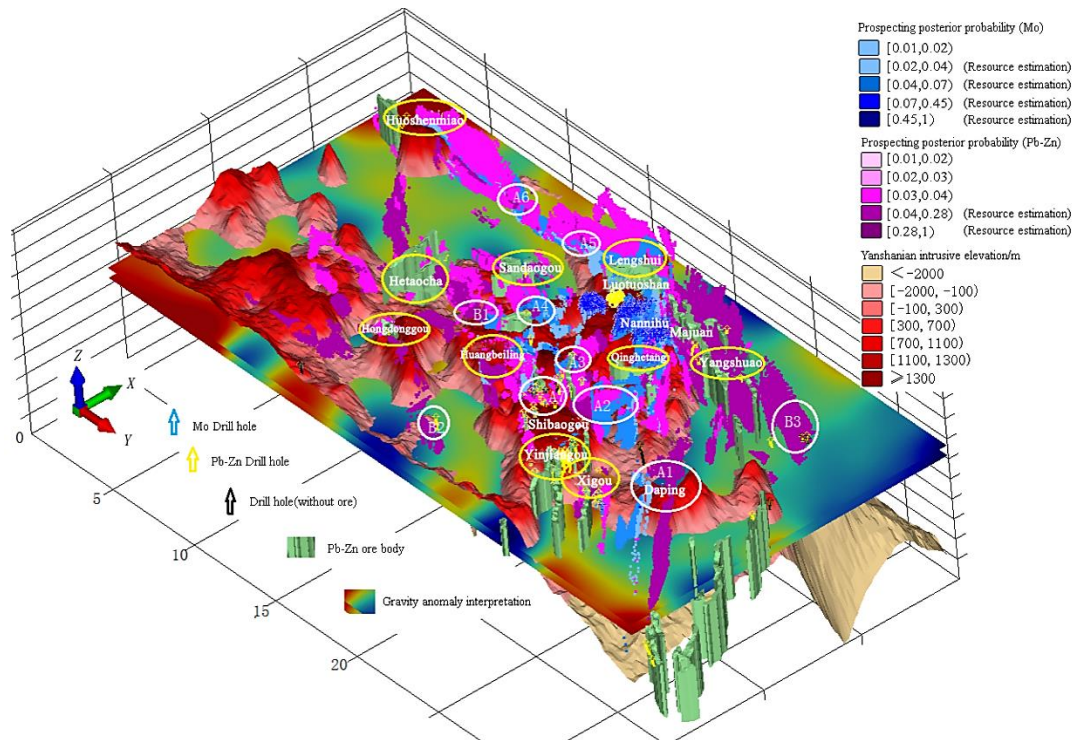


Fig. 9. The Mo and Pb-Zn-Ag priority targeting using GeoCube software in Luanchuan district

Рис. 9. Определение приоритетных целей по Mo и Pb-Zn-Ag с использованием программного обеспечения GeoCube в районе Луаньчуань

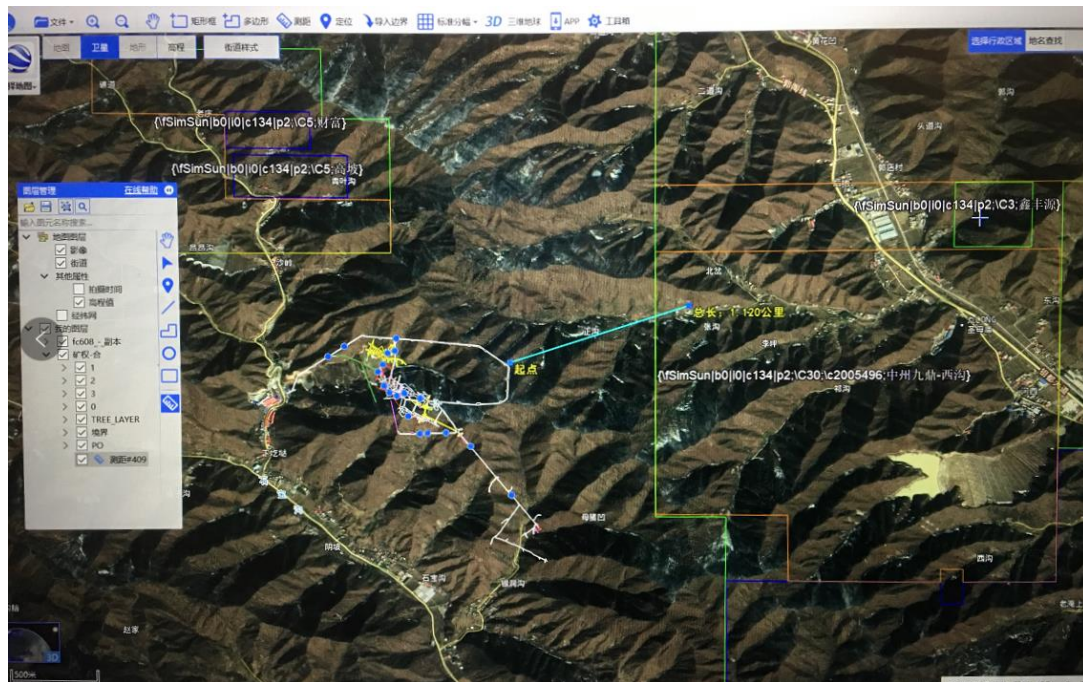
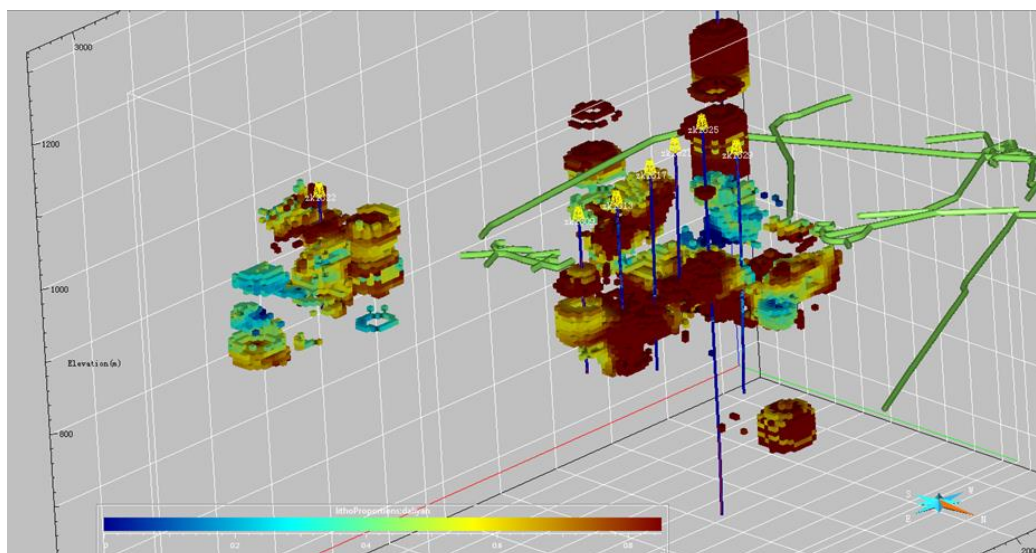


Fig. 10. Digital mine 3D platform based on high resolution remote sensing and channel engineering in Chitudian deposit in Luanchuan district

Рис. 10. Цифровая шахтная 3D-платформа, основанная на данных дистанционного зондирования высокого разрешения и проектирования каналов на месторождении Читудуан в районе Луаньчуань



**Fig. 11. Three-dimensional engineering model of high-precision exploration drilling, orebody and channel mining in Chitudian Xigou lead-zinc Mine (location in Fig. 10)**

**Рис. 11. Трехмерная инженерная модель высокоточного разведочного бурения, разработки рудных тел и каналов на свинцово-цинковом руднике Читудуан Сигоу (расположение см. на рис. 10)**

geological and geophysical forward and inverse modeling method assisted by rock geochemistry to comprehensively interpret metallogenic terranes. It can better identify the favorable sections of concealed granite porphyry and porphyry-skarn Mo-W mineralization in Yuku, so as to provide an important basis for subsequent deep prospecting practice and exploration engineering deployment; (b) Flac3D simulation is used to analyze the geometric shape and influence domain of three-dimensional intrusive rock mass, which can deeply analyze the metallogenic system of porphyry Mo, skarn Mo (W) and hydrothermal Pb-Zn-Ag-Au ore bodies, so as to provide a scientific basis for the comprehensive evaluation of digital mine resources; (c) using high-resolution remote sensing to extract iron pollution information and correlate mining pollution can dynamically monitor the treatment and restoration of ecological environment.

(3) Using the metallogenic system theory, combined with the multi-parameter and multi-method modeling of three-dimensional metallogenic geological body, it is better to reveal the Shibaogou porphyry Mo deposit in the Chitudian area. Temporal and spatial distribution of skarn Mo-W-Zn-Pb deposits and the distal Yindonggou and Xigou hydrothermal Pb Zn Ag Au deposits and quantitative evaluation of resources [6]: Mo (W) industrial ore bodies are built from 1200 m to 400 m above the surface, and the vertical depth

of lead-zinc ore bodies is 600 m; The deep Mo-W prediction target area in the Yuku section is 2.5 km, which is the most favorable section for Mo (W) prospecting in the ore concentration area and the section with the largest value of industrial ore body. The main concealed ore body is 200 m below the surface.

(4) Based on the 3D models of geological bodies such as strata, fault structures, and ore bodies in the Luanchuan ore concentration area, it is recognized that the NW-trending fault structures usually have compression and torsion characteristics, which inherited the thrust nappe tectonic environment in the southern margin of the North China Craton, and the groundwater pollution in the metallogenic section of the existing mines is not developed. After the metallogenic period, the fault structure cuts through the surface, resulting in the infiltration of surface water into the mining section, resulting in secondary hydrogeological pollutions, and even erosion, resulting in geological disasters such as mining roadway collapse. Therefore, in terms of hydrogeology, it is necessary to avoid the excavation of NE structures, prevent the water pollution of NW-trending ore bodies, and take ban measures when necessary. In addition, the vein-type Pb ore body in the east of Chitudian area which is in the east of the southwest section of Shibaogou Mo polymetallic deposit should be avoided as much as possible at the intersection of NW trending



nappe structure and its associated NE trending fault structure for the mining of Zn ore body, because it is usually the collection section of groundwater sources, it is necessary to avoid groundwater disorder and pollution.

(5) The modeling and analysis of three-dimensional multi-parameter (geological, geophysical, geochemical, and hyperspectral) geological bodies in the study area greatly improves the reliability of borehole core logging and the mining of quantitative massive information and enriches the content of lithology logging of previous exploration boreholes. For example, hyperspectral core scanning in the Shangfang deposit, from exploration mineralogy to beneficiation process

mineralogy, has laid the foundation for real-time mining. In recent 20 years, China's mineral survey and exploration have accumulated a large number of core data. Using the data mining of core physical properties, lithology, and spectral continuity, we can systematically carry out deep prospecting and resource evaluation in the study area: such as the mining and development of useful elements, including the exploration, development, and application of associated elements such as Cu, Ag, Au, and Re; Analysis of harmful elements (As, Sb, Hg, S): prevent man-made disasters in the mining industry, such as pollution of waste ore and pollution of tailings pond dust to air, groundwater, surface water, and soil.

### References

1. Zhao P. *Quantitative geoscience methods and applications*. Beijing: Higher Education Press; 2004. (In Chinese).
2. Ye T., Lv Z., Pang Z., et al. *Theory and method of prospecting prediction in exploration area*. Beijing: Geological Publishing House; 2014. 568 p. (In Chinese).
3. Mo X., Dong G., Deng J., et al. *Metallogenic dynamic background of large super large deposits*. Beijing: Geological Publishing House; 2020. 487 p. (In Chinese).
4. Zhai Y., Liu J., Xue C., et al. *Metallogenic process and mechanism of large super large deposits*. Beijing: Geological Publishing House; 2020. 428 p. (In Chinese).
5. Zhao P., Chen Y., Zhang S., et al. *Quantitative evaluation of large super large deposits*. Beijing: Geological Publishing House; 2020. 388 p. (In Chinese).
6. Wang G., Zhang S., Chen J., et al. *Technical manual for quantitative evaluation of large super large deposits*. Beijing: Geological Publishing House; 2019. 175 p. (In Chinese).
7. Zhao P. Digital prospecting and quantitative evaluation in the era of big data. *Geological Bulletin of China*. 2015;34(7):1255-1259. (In Chinese).
8. Xiao K., Sun L., Li N., Wang K., Fan J., Ding J. Mineral resources assessment under the thought of big data. *Geological Bulletin of China*. 2015;34(7):1266-1272. (In Chinese).
9. Guo H. A project on big Earth data science engineering. *Bulletin of the Chinese Academy of Sciences*. 2018;33(8):818-824. (In Chinese). <https://doi.org/10.16418/j.issn.1000-3045.2018.08.008>.
10. Zhou Y., Chen S., Zhang Q., Xiao F., Wang S., Liu Y., et al. Advances and prospects of big data and mathematical geoscience. *Acta Petrologica Sinica*. 2018;34(2):255-263. (In Chinese).
11. Wu C., Liu G. Big data and future development of geology. *Geological Bulletin of China*. 2019;38(7):1081-1088. (In Chinese).
12. Zhao P. Characteristics of geological big data and its rational development and utilization. *Earth Science Frontiers*. 2019;26(4):1-5. (In Chinese).
13. Huang L. *High precision 3D geological modeling and evaluation of Wunugetushan mine in Inner Mongolia*. Beijing: China University of Geosciences (Beijing); 2020. (In Chinese).
14. Wang G., Zhang Z., Li R., Li J., Sha D., Zeng Q., et al. Resource prediction and assessment based on 3D/4D big data modeling and deep integration in key ore districts of North China. *Science China Earth Sciences*. 2021;64:1590-1606. <https://doi.org/10.1007/s11430-020-9791-4>.
15. Wang G., Ma Z., Li R., Song Y., Qu J., Zhang S., et al. Integration of multi-source and multi-scale datasets for 3D structural modeling for subsurface exploration targeting, Luanchuan Mo-polymetallic district, China. *Journal of Applied Geophysics*. 2017;139:269-290. <https://doi.org/10.1016/j.jappgeo.2017.02.027>.
16. Buttgeriet D., Benndorf J., Buxton M. W. N. Real-time mining: grade monitoring und control cockpit. *AKIDA 2016*. 2016:49-60. (In German).
17. Wambeke T., Benndorf J. A simulation-based geostatistical approach to real-time reconciliation of the grade control model. *Mathematical Geosciences*. 2017;49(1):1-37. <https://doi.org/10.1007/s11004-016-9658-6>.
18. Ailleres L., Grose L., Laurent G., Armit R., Jessell M., Caumon G., et al. LOOP: a new open source platform for 3D geo-structural simulations. In: *Three-dimensional geological mapping: workshop extended abstracts*. Cham: Illinois State Geological Survey; 2018. p.14-18.
19. Kreuzer O. P., Yousefi M., Nykänen V. Introduction to the special issue on spatial modelling and analysis of ore-forming processes in mineral exploration targeting. *Ore Geology Reviews*. 2020;119(3):103391. <https://doi.org/10.1016/j.oregeorev.2020.103391>.
20. Pär W. *3D, 4D and predictive modelling of major mineral belts in Europe*. Cham: Springer; 2015. 331 p.
21. Wang G., Zhang S., Yan C., Song Y., Ma Z., Li D. 3D geological modeling of Luanchuan molybdenum polymetallic mining area based on geological and gravity and magnetic data integration. *Earth Science – Journal of China University of Geosciences*. 2011;36(2):266-360.





22. Ma Z., Yan C., Song Y., et al. Application of CSAMT and sip geophysical prospecting combination method in the exploration of concealed metal deposits in Luanchuan mountain area, Henan Province. *Geology and Exploration*. 2011;47(4):654-662.
23. Wang G., Li R., Carranza E. J. M., Zhang S., Yan C., Zhu Y., et al. 3D geological modeling for prediction of subsurface Mo targets in the Luanchuan district, China. *Ore Geology Reviews*. 2015;71:592-610. <https://doi.org/10.1016/j.oregeorev.2015.03.002>.
24. Wang G., Pang Z., Boisvert J. B., Hao Y., Cao Y., Qu J. Quantitative assessment of mineral resources by combining geostatistics and fractal methods in the Tongshan porphyry Cu deposit (China). *Journal of Geochemical Exploration*. 2013;134:85-98. <https://doi.org/10.1016/j.gexplo.2013.08.004>.
25. Wang G., Zhang S., Yan C., Song Y., Sun Y., Li D., et al. Mineral potential targeting and resource assessment based on 3D geological modeling in Luanchuan region, China. *Computers & Geosciences*. 2011;37(12):1976-1988. <https://doi.org/10.1016/j.cageo.2011.05.007>.
26. Wang G., Zhang S., Yan C., Xu G., Ma M., Li K., et al. Application of the multifractal singular value decomposition for delineating geophysical anomalies associated with molybdenum occurrences in the Luanchuan ore field (China). *Journal of Applied Geophysics*. 2012;86:109-119. <https://doi.org/10.1016/j.jappgeo.2012.07.013>.
27. Zhang Z., Wang G., Ma Z., Carranza E. J. M., Jia W., Du J., et al. Batholith-stock scale exploration targeting based on multi-source geological and geophysical datasets in the Luanchuan Mo polymetallic district, China. *Ore Geology Reviews*. 2020;118:103225. <https://doi.org/10.1016/j.oregeorev.2019.103225>.
28. Zhang Z., Wang G., Ma Z., Gong X. Interactive 3D modeling by integration of geoscience datasets for exploration targeting in Luanchuan Mo polymetallic district, China. *Natural Resources Research*. 2018;27:315-346. <https://doi.org/10.1007/s11053-017-9353-4>.
29. Zhang Z., Zhang J., Wang G., Carranza E. J. M., Pang Z., Wang H. From 2D to 3D modeling of mineral prospectivity using multi-source geoscience datasets, Wulong gold district, China. *Natural Resources Research*. 2020;29(1):345-364. <https://doi.org/10.1007/s11053-020-09614-6>.
30. Li R., Wang G., Carranza E. J. M. GeoCube: a 3D mineral resources quantitative prediction and assessment system. *Computers & Geosciences*. 2016;89:161-173. <https://doi.org/10.1016/j.cageo.2016.01.012>.
31. Agterberg F. P., Bonham-Carter G. F., Cheng Q., Wright D. F. Weights of evidence modeling and weighted logistic regression for mineral potential mapping. In: *Computers in geology – 25 years of progress*. New York: Oxford University Press; 1993. p.13–32.
32. Cheng Q., Agterberg F. P., Ballantyne S. B. The separation of geochemical anomalies from background by fractal methods. *Journal of Geochemical Exploration*. 1994;51(2):109-130. [https://doi.org/10.1016/0375-6742\(94\)90013-2](https://doi.org/10.1016/0375-6742(94)90013-2).
33. Turcotte D. L. *Fractals and chaos in geology and geophysics*. Cambridge: Cambridge University Press; 1997. 416 p.
34. Pan G., Harris D. P. *Information synthesis for mineral exploration*. New York: Oxford University Press; 2000. 450 p.
35. Afzal P., Alghalandis Y. F., Khakzad A., Moarefvand P., Omran N. R. Delineation of mineralization zones in porphyry Cu deposits by fractal concentration-volume modeling. *Journal of Geochemical Exploration*. 2011;108(3):220-232. <https://doi.org/10.1016/j.gexplo.2011.03.005>.
36. Carranza E. J. M. Geocomputation of mineral exploration targets. *Computers & Geosciences*. 2011;37(12):1907-1916. <https://doi.org/10.1016/j.cageo.2011.11.009>.
37. Calcagno P., Chilès J. P., Courriou G., Guillen A. Geological modelling from field data and geological knowledge: Part I. Modelling method coupling 3D potential-field interpolation and geological rules. *Physics of the Earth and Planetary Interiors*. 2008;171(1-4):147-157. <https://doi.org/10.1016/j.pepi.2008.06.013>.
38. Caumon G., Collon-Drouaillet P., de Veslud C. L. C., Viseur S., Sausse J. Surface-based 3D modeling of geological structures. *Mathematical Geosciences*. 2009;41(8):927-945. <https://doi.org/10.1007/s11004-009-9244-2>.
39. Fallara F., Legault M., Rabeau O. 3-D integrated geological modeling in the Abitibi Subprovince (Québec, Canada): techniques and applications. *Exploration & Mining Geology*. 2006;15(1-2):27-43. <https://doi.org/10.2113/gsemg.15.1-2.27>.
40. Graham G. E., Kokaly R. F., Kelley K. D., Hoefen T. M., Johnson M. R., Hubbard B. E. Application of imaging spectroscopy for mineral exploration in Alaska: a study over porphyry Cu deposits in the eastern Alaska Range. *Economic Geology*. 2018;113(2):489-510. <https://doi.org/10.5382/econgeo.2018.4559>.
41. Houlding S. W. *3D geoscience modeling: computer techniques for geological characterization*. Berlin: Springer-Verlag Berlin Heidelberg; 1994. 311 p.
42. Mallet J. L. Discrete smooth interpolation in geometric modelling. *Computer-Aided Design*. 1992;24(4):178-191. [https://doi.org/10.1016/0010-4485\(92\)90054-E](https://doi.org/10.1016/0010-4485(92)90054-E).
43. Mallet J. L. GOCAD: a computer aided design program for geological applications. In: Turner AK (ed.). *Three-dimensional modeling with geoscientific information systems*. Dordrecht: Kluwer Academic Publishers; 1992. p.123–142.
44. Mallet J. L. Discrete modeling for natural objects. *Mathematical Geology*. 1997;29(2):199-219. <https://doi.org/10.1007/BF02769628>.
45. Mallet J. L. *Geomodeling*. New York: Oxford University Press; 2002. 624 p.
46. Jackson R. G. Application of 3D geochemistry to mineral exploration. *Geochemistry: Exploration, Environment, Analysis*. 2010;10(2):143-156. <https://doi.org/10.1144/1467-7873/09-217>.
47. Kaufmann O., Martin T. 3D geological modelling from boreholes, cross-sections and geological maps, application over former natural gas storages in coal mines. *Computers & Geosciences*. 2008;34(3):278-290. <https://doi.org/10.1016/j.cageo.2007.09.005>.
48. Leite E. P., de Souza Filho C. R. Probabilistic neural networks applied to mineral potential mapping for



platinum group elements in the Serra Leste region, Carajás Mineral Province, Brazil. *Computers & Geosciences*. 2009;35(3):675-687. <https://doi.org/10.1016/j.cageo.2008.05.003>.

49. Lindsay M. D., Aillères L., Jessell M. W., de Kemp E. A., Betts P. G. Locating and quantifying geological uncertainty in three-dimensional models: analysis of the Gippsland Basin, southeastern Australia. *Tectonophysics*. 2012;546-547:10-27. <https://doi.org/10.1016/j.tecto.2012.04.007>.

50. Pollock D. W., Barron O. V., Donn M. J. 3D exploratory analysis of descriptive lithology records using regular expressions. *Computers & Geosciences*. 2012;39:111-119. <https://doi.org/10.1016/j.cageo.2011.06.018>.

51. Sprague K., de Kemp E., Wong W., McGaughey J., Perron G., Barrie T. Spatial targeting using queries in a 3-D GIS environment with application to mineral exploration. *Computers & Geosciences*. 2006;32(3):396-418. <https://doi.org/10.1016/j.cageo.2005.07.008>.

52. Zanchi A., Francesca S., Stefano Z., Simone S., Graziano G. 3D reconstruction of complex geological bodies: examples from the Alps. *Computers & Geosciences*.

2009;35(1):49-69. <https://doi.org/10.1016/j.cageo.2007.09.003>.

53. Han J., Yun H., Hu H., et al. Characteristics and resource prediction of deep tungsten molybdenum ore bodies in Luanchuan ore concentration area, Henan Province. *Metal Mines*. 2020;533(11):141-151. (In Chinese).

54. Jia H., Liu J., Yin X., Wang C., Geng H., Chi H., et al. Study on mine geological environment assessment in Tongling pyrite concentrated mining area, Anhui. *Geoscience Frontier*. 2021;84(4):131-141. (In Chinese). <https://doi.org/10.13745/j.esf.sf.2020.10.16>.

55. He Y., Du H., Peng F. Application of disaster monitoring and early warning in open-pit and underground rock mass engineering of Sandaozhuang mine. *Nonferrous Geology*. 2017;69(4):81-85. (In Chinese).

56. Cao H., Zhang S., Santosh M., Zheng L., Tang L., Li D., et al. The Luanchuan Mo-W-Pb-Zn-Ag magmatic-hydrothermal system in the East Qinling metallogenic belt, China: constraints on metallogenesis from C-H-O-S-Pb isotope compositions and Rb-Sr isochron ages. *Journal of Asian Earth Sciences*. 2015;111:751-780. <https://doi.org/10.1016/j.jseaes.2015.06.005>.

#### Список источников

1. Zhao P. Quantitative geoscience methods and applications. Beijing: Higher Education Press, 2004.

2. Ye T., Lv Z., Pang Z., et al. Theory and method of prospecting prediction in exploration area. Beijing: Geological Publishing House, 2014. 568 p.

3. Mo X., Dong G., Deng J., et al. Metallogenic dynamic background of large super large deposits. Beijing: Geological Publishing House, 2020. 487 p.

4. Zhai Y., Liu J., Xue C., et al. Metallogenic process and mechanism of large super large deposits. Beijing: Geological Publishing House, 2020. 428 p.

5. Zhao P., Chen Y., Zhang S., et al. Quantitative evaluation of large super large deposits. Beijing: Geological Publishing House, 2020. 388 p.

6. Wang G., Zhang S., Chen J., et al. Technical manual for quantitative evaluation of large super large deposits. Beijing: Geological Publishing House, 2019. 175 p.

7. Zhao P. Digital prospecting and quantitative evaluation in the era of big data // *Geological Bulletin of China*. 2015. Vol. 34. Iss. 7. P. 1255-1259.

8. Xiao K., Sun L., Li N., Wang K., Fan J., Ding J. Mineral resources assessment under the thought of big data // *Geological Bulletin of China*. 2015. Vol. 34. Iss. 7. P. 1266-1272.

9. Guo H. A project on big Earth data science engineering // *Bulletin of the Chinese Academy of Sciences*. 2018. Vol. 33. Iss. 8. P. 818-824. <https://doi.org/10.16418/j.issn.1000-3045.2018.08.008>.

10. Zhou Y., Chen S., Zhang Q., Xiao F., Wang S., Liu Y., et al. Advances and prospects of big data and mathematical geoscience // *Acta Petrologica Sinica*. 2018. Vol. 34. Iss. 2. P. 255-263.

11. Wu C., Liu G. Big data and future development of geology // *Geological Bulletin of China*. 2019. Vol. 38. Iss. 7. P. 1081-1088.

12. Zhao P. Characteristics of geological big data and

its rational development and utilization // *Earth Science Frontiers*. 2019. Vol. 26. Iss. 4. P. 1-5.

13. Huang L. High precision 3D geological modeling and evaluation of Wunugetushan mine in Inner Mongolia. Beijing: China University of Geosciences (Beijing), 2020.

14. Wang G., Zhang Z., Li R., Li J., Sha D., Zeng Q., et al. Resource prediction and assessment based on 3D/4D big data modeling and deep integration in key ore districts of North China // *Science China Earth Sciences*. 2021. Vol. 64. P. 1590-1606. <https://doi.org/10.1007/s11430-020-9791-4>.

15. Wang G., Ma Z., Li R., Song Y., Qu J., Zhang S., et al. Integration of multi-source and multi-scale datasets for 3D structural modeling for subsurface exploration targeting, Luanchuan Mo-polymetallic district, China // *Journal of Applied Geophysics*. 2017. Vol. 139. P. 269-290. <https://doi.org/10.1016/j.jappgeo.2017.02.027>.

16. Buttgerit D., Benndorf J., Buxton M. W. N. Real-time mining: grade monitoring und control cockpit // *AKIDA* 2016. 2016. P. 49-60.

17. Wambeke T., Benndorf J. A simulation-based geostatistical approach to real-time reconciliation of the grade control model // *Mathematical Geosciences*. 2017. Vol. 49. Iss. 1. P. 1-37. <https://doi.org/10.1007/s11004-016-9658-6>.

18. Aillères L., Grose L., Laurent G., Armit R., Jessell M., Caumon G., et al. LOOP: a new open source platform for 3D geo-structural simulations // *Three-dimensional geological mapping: workshop extended abstracts*. Champaign: Illinois State Geological Survey, 2018. P. 14-18.

19. Kreuzer O. P., Yousefi M., Nykänen V. Introduction to the special issue on spatial modelling and analysis of ore-forming processes in mineral exploration targeting // *Ore Geology Reviews*. 2020. Vol. 119. Iss. 3. P. 103391. <https://doi.org/10.1016/j.oregeorev.2020.103391>.

20. Pár W. 3D, 4D and predictive modelling of major mineral belts in Europe. Cham: Springer, 2015. 331 p.



21. Wang G., Zhang S., Yan C., Song Y., Ma Z., Li D. 3D geological modeling of Luanchuan molybdenum polymetallic mining area based on geological and gravity and magnetic data integration // *Earth Science – Journal of China University of Geosciences*. 2011. Vol. 36. Iss. 2. P. 266–360.
22. Ma Z., Yan C., Song Y., et al. Application of CSAMT and sip geophysical prospecting combination method in the exploration of concealed metal deposits in Luanchuan mountain area, Henan Province // *Geology and Exploration*. 2011. Vol. 47. Iss. 4. P. 654–662.
23. Wang G., Li R., Carranza E. J. M., Zhang S., Yan C., Zhu Y., et al. 3D geological modeling for prediction of subsurface Mo targets in the Luanchuan district, China // *Ore Geology Reviews*. 2015. Vol. 71. P. 592–610. <https://doi.org/10.1016/j.oregeorev.2015.03.002>.
24. Wang G., Pang Z., Boisvert J. B., Hao Y., Cao Y., Qu J. Quantitative assessment of mineral resources by combining geostatistics and fractal methods in the Tongshan porphyry Cu deposit (China) // *Journal of Geochemical Exploration*. 2013. Vol. 134. P. 85–98. <https://doi.org/10.1016/j.gexplo.2013.08.004>.
25. Wang G., Zhang S., Yan C., Song Y., Sun Y., Li D., et al. Mineral potential targeting and resource assessment based on 3D geological modeling in Luanchuan region, China // *Computers & Geosciences*. 2011. Vol. 37. Iss. 12. P. 1976–1988. <https://doi.org/10.1016/j.cageo.2011.05.007>.
26. Wang G., Zhang S., Yan C., Xu G., Ma M., Li K., et al. Application of the multifractal singular value decomposition for delineating geophysical anomalies associated with molybdenum occurrences in the Luanchuan ore field (China) // *Journal of Applied Geophysics*. 2012. Vol. 86. P. 109–119. <https://doi.org/10.1016/j.jappgeo.2012.07.013>.
27. Zhang Z., Wang G., Ma Z., Carranza E. J. M., Jia W., Du J., et al. Batholith-stock scale exploration targeting based on multi-source geological and geophysical datasets in the Luanchuan Mo polymetallic district, China // *Ore Geology Reviews*. 2020. Vol. 118. P. 103225. <https://doi.org/10.1016/j.oregeorev.2019.103225>.
28. Zhang Z., Wang G., Ma Z., Gong X. Interactive 3D modeling by integration of geoscience datasets for exploration targeting in Luanchuan Mo polymetallic district, China // *Natural Resources Research*. 2018. Vol. 27. P. 315–346. <https://doi.org/10.1007/s11053-017-9353-4>.
29. Zhang Z., Zhang J., Wang G., Carranza E. J. M., Pang Z., Wang H. From 2D to 3D modeling of mineral prospectivity using multi-source geoscience datasets, Wulong gold district, China // *Natural Resources Research*. 2020. Vol. 29. Iss. 1. P. 345–364. <https://doi.org/10.1007/s11053-020-09614-6>.
30. Li R., Wang G., Carranza E. J. M. GeoCube: a 3D mineral resources quantitative prediction and assessment system // *Computers & Geosciences*. 2016. Vol. 89. P. 161–173. <https://doi.org/10.1016/j.cageo.2016.01.012>.
31. Agterberg F. P., Bonham-Carter G. F., Cheng Q., Wright D. F. Weights of evidence modeling and weighted logistic regression for mineral potential mapping // *Computers in geology – 25 years of progress*. New York: Oxford University Press. 1993. P. 13–32.
32. Cheng Q., Agterberg F. P., Ballantyne S. B. The separation of geochemical anomalies from background by fractal methods // *Journal of Geochemical Exploration*. 1994. Vol. 51. Iss. 2. P. 109–130. [https://doi.org/10.1016/0375-6742\(94\)90013-2](https://doi.org/10.1016/0375-6742(94)90013-2).
33. Turcotte D. L. Fractals and chaos in geology and geophysics. Cambridge: Cambridge University Press, 1997. 416 p.
34. Pan G., Harris D. P. Information synthesis for mineral exploration. New York: Oxford University Press, 2000. 450 p.
35. Afzal P., Alghalandis Y. F., Khakzad A., Moarefvand P., Omran N. R. Delineation of mineralization zones in porphyry Cu deposits by fractal concentration-volume modeling // *Journal of Geochemical Exploration*. 2011. Vol. 108. Iss. 3. P. 220–232. <https://doi.org/10.1016/j.gexplo.2011.03.005>.
36. Carranza E. J. M. Geocomputation of mineral exploration targets // *Computers & Geosciences*. 2011. Vol. 37. Iss. 12. P. 1907–1916. <https://doi.org/10.1016/j.cageo.2011.11.009>.
37. Calcagno P., Chilès J. P., Courrioux G., Guillen A. Geological modelling from field data and geological knowledge: Part I. Modelling method coupling 3D potential-field interpolation and geological rules // *Physics of the Earth and Planetary Interiors*. 2008. Vol. 171. Iss. 1-4. P. 147–157. <https://doi.org/10.1016/j.pepi.2008.06.013>.
38. Caumon G., Collon-Drouaillet P., de Veslud C. L. C., Viseur S., Sausse J. Surface-based 3D modeling of geological structures // *Mathematical Geosciences*. 2009. Vol. 41. Iss. 8. P. 927–945. <https://doi.org/10.1007/s11004-009-9244-2>.
39. Fallara F., Legault M., Rabeau O. 3-D integrated geological modeling in the Abitibi Subprovince (Québec, Canada): techniques and applications // *Exploration & Mining Geology*. 2006. Vol. 15. Iss. 1-2. P. 27–43. <https://doi.org/10.2113/gsemg.15.1-2.27>.
40. Graham G. E., Kokaly R. F., Kelley K. D., Hoefen T. M., Johnson M. R., Hubbard B. E. Application of imaging spectroscopy for mineral exploration in Alaska: a study over porphyry Cu deposits in the eastern Alaska Range // *Economic Geology*. 2018. Vol. 113. Iss. 2. P. 489–510. <https://doi.org/10.5382/econgeo.2018.4559>.
41. Houlding S. W. 3D geoscience modeling: computer techniques for geological characterization. Berlin: Springer-Verlag Berlin Heidelberg, 1994. 311 p.
42. Mallet J. L. Discrete smooth interpolation in geometric modelling // *Computer-Aided Design*. 1992. Vol. 24. Iss. 4. P. 178–191. [https://doi.org/10.1016/0010-4485\(92\)90054-E](https://doi.org/10.1016/0010-4485(92)90054-E).
43. Mallet J. L. GOCAD: a computer aided design program for geological applications // *Three-dimensional modeling with geoscientific information systems* / ed. A.K. Turner. Dordrecht: Kluwer Academic Publishers, 1992. P. 123–142.
44. Mallet J. L. Discrete modeling for natural objects // *Mathematical Geology*. 1997. Vol. 29. Iss. 2. P. 199–219. <https://doi.org/10.1007/BF02769628>.
45. Mallet J. L. Geomodelling. New York: Oxford University Press, 2002. 624 p.
46. Jackson R. G. Application of 3D geochemistry to mineral exploration // *Geochemistry: Exploration, Environ-*



ment, Analysis. 2010. Vol. 10. Iss. 2. P. 143–156. <https://doi.org/10.1144/1467-7873/09-217>.

47. Kaufmann O., Martin T. 3D geological modelling from boreholes, cross-sections and geological maps, application over former natural gas storages in coal mines // Computers & Geosciences. 2008. Vol. 34. Iss. 3. P. 278–290. <https://doi.org/10.1016/j.cageo.2007.09.005>.

48. Leite E. P., de Souza Filho C. R. Probabilistic neural networks applied to mineral potential mapping for platinum group elements in the Serra Leste region, Carajás Mineral Province, Brazil // Computers & Geosciences. 2009. Vol. 35. Iss. 3. P. 675–687. <https://doi.org/10.1016/j.cageo.2008.05.003>.

49. Lindsay M. D., Aillères L., Jessell M. W., de Kemp E. A., Betts P. G. Locating and quantifying geological uncertainty in three-dimensional models: analysis of the Gippsland Basin, southeastern Australia // Tectonophysics. 2012. Vol. 546–547. P. 10–27. <https://doi.org/10.1016/j.tecto.2012.04.007>.

50. Pollock D. W., Barron O. V., Donn M. J. 3D exploratory analysis of descriptive lithology records using regular expressions // Computers & Geosciences. 2012. Vol. 39. P. 111–119. <https://doi.org/10.1016/j.cageo.2011.06.018>.

51. Sprague K., de Kemp E., Wong W., McGaughey J., Perron G., Barrie T. Spatial targeting using queries in a 3-D GIS environment with application to mineral exploration // Computers & Geosciences. 2006. Vol. 32. Iss. 3.

P. 396–418. <https://doi.org/10.1016/j.cageo.2005.07.008>.

52. Zanchi A., Francesca S., Stefano Z., Simone S., Graziano G. 3D reconstruction of complex geological bodies: examples from the Alps // Computers & Geosciences. 2009. Vol. 35. Iss. 1. P. 49–69. <https://doi.org/10.1016/j.cageo.2007.09.003>.

53. Han J., Yun H., Hu H., et al. Characteristics and resource prediction of deep tungsten molybdenum ore bodies in Luanchuan ore concentration area, Henan Province // Metal Mines. 2020. Vol. 533. Iss. 11. P. 141–151.

54. Jia H., Liu J., Yin X., Wang C., Geng H., Chi H., et al. Study on mine geological environment assessment in Tongling pyrite concentrated mining area, Anhui // Geoscience Frontier. 2021. Vol. 84. Iss. 4. P. 131–141. <https://doi.org/10.13745/j.esf.sf.2020.10.16>.

55. He Y., Du H., Peng F. Application of disaster monitoring and early warning in open-pit and underground rock mass engineering of Sandaozhuang mine // Nonferrous Geology. 2017. Vol. 69. Iss. 4. P. 81–85.

56. Cao H., Zhang S., Santosh M., Zheng L., Tang L., Li D., et al. The Luanchuan Mo-W-Pb-Zn-Ag magmatic-hydrothermal system in the East Qinling metallogenic belt, China: constraints on metallogenesis from C-H-O-S-Pb isotope compositions and Rb-Sr isochron ages // Journal of Asian Earth Sciences. 2015. Vol. 111. P. 751–780. <https://doi.org/10.1016/j.jseaes.2015.06.005>.

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



**Gongwen Wang** is a professor at China University of Geosciences (Beijing) (CUGB). He received a B.Sc. degree in Mineral exploration from Northeastern University, China, in 1993, a M.Sc. degree in Mathematical Geology from CUGB in 2000, and a Ph.D. degree in Earth exploration and information technology from CUGB in 2006. He works at the School of Earth Science and Mineral Resources, CUGB since 2000. He joined CUGB in September 2020. His research interest focuses on 3D/4D modeling for mineral resources and environment assessment using big data of geoscience and artificial intelligence.

**Гунвэнь Ван** – профессор Китайского университета наук о Земле (Пекин). Получил степень бакалавра в области разведки полезных ископаемых в Северо-Восточном университете Китая в 1993 году, степень магистра в области математической геологии в Китайском университете наук о Земле в 2000 году и там же в 2006 году получил докторскую степень в области исследования Земли и информационных технологий. Работает в Школе наук о Земле и минеральных ресурсов Китайского университета наук о Земле с 2000 года. Его исследовательские интересы сосредоточены на 3D/4D-моделировании для оценки минеральных ресурсов и окружающей среды с использованием больших массивов геологических данных и искусственного интеллекта.

#### Gongwen Wang,

Dr. Sci. (Geol. & Mineral.), Professor,  
Deputy Dean,  
School of Earth Science and Mineral Resources,  
China University of Geosciences,  
Beijing, China,  
[gwwang@cugb.edu.cn](mailto:gwwang@cugb.edu.cn).

#### Ван Гунвэнь,

доктор геолого-минералогических наук, профессор,  
заместитель декана,  
Школа наук о Земле и минеральных ресурсов,  
Китайский университет наук о Земле,  
г. Пекин, Китай,  
[gwwang@cugb.edu.cn](mailto:gwwang@cugb.edu.cn).



**Shouting Zhang,**

China University of Geosciences,  
Beijing, China.

**Чжан Шоутин,**

Китайский университет наук о Земле,  
г. Пекин, Китай.

**Changhai Yan,**

Key Laboratory of Metallogenetic Processes and Resource Utilization,  
Zhengzhou, China.

**Янь Чанхай,**

Центральная лаборатория металлогенических процессов и утилизации ресурсов,  
г. Чжэнчжоу, Китай.

**Zhenshan Pang,**

China Geological Survey,  
Beijing, China.

**Пан Чжэньшань,**

Геологическая служба Китая,  
г. Пекин, Китай.

**Hongwei Wang,**

Luanchuan County Natural Resources Bureau,  
Luoyang, China.

**Ван Хунвэй,**

Бюро природных ресурсов уезда Луаньчуань,  
г. Лоян, Китай.

**Zhankui Feng,**

Henan Jiuzhou Zhongding Mining Co., Ltd.,  
Luoyang, China.

**Фэн Чжанькуй,**

Хэнаньская горнодобывающая компания Цзычжоу Чжундин Майнинг Ко. Лимитед,  
г. Лоян, Китай.

**Hong Dong,**

China Geology & Mining Co., Ltd.,  
Beijing, China.

**Дун Хун,**

Геологическая и горнодобывающая компания Китая,  
г. Пекин, Китай.

**Hongtao Cheng,**

Henan Zhongxin Mining Co., Ltd.,  
Luoyang, China.

**Чэн Хунтао,**

Хэнаньская горнодобывающая компания Чжунсинь Майнинг Ко. Лимитед,  
г. Лоян, Китай.

**Yaqing He,**

Henan China Molybdenum Co., Ltd.,  
Luoyang, China.

**Хэ Яцин,**

Хэнаньская компания Китай Молибден Лимитед,  
г. Лоян, Китай.

**Ruixi Li,**

China University of Geosciences,  
Beijing, China.

**Ли Жуйси,**

Китайский университет наук о Земле,  
г. Пекин, Китай.



**Zhiqiang Zhang,**

China Geological Survey,  
Beijing, China.

**Чжан Чжицян,**

Геологическая служба Китая,  
г. Пекин, Китай.

**Leilei Huang,**

China University of Geosciences,  
Beijing, China.

**Хуан Лэйлэй,**

Китайский университет наук о Земле,  
г. Пекин, Китай.

**Nana Guo,**

Luanchuan County Natural Resources Bureau,  
Luoyang, China.

**Го Нана,**

Бюро природных ресурсов уезда Луаньчуань,  
г. Лоян, Китай.

**Contribution of the authors / Вклад авторов**

The authors contributed equally to this article.

Все авторы сделали эквивалентный вклад в подготовку публикации.

**Conflict of interests / Конфликт интересов**

The authors declare no conflicts of interests.

Авторы заявляют об отсутствии конфликта интересов.

*The final manuscript has been read and approved by all the co-authors.*

*Все авторы прочитали и одобрили окончательный вариант рукописи.*

**Information about the article / Информация о статье**

The article was submitted 07.06.2021; approved after reviewing 09.07.2021; accepted for publication 13.08.2021.

Статья поступила в редакцию 07.06.2021; одобрена после рецензирования 09.07.2021; принята к публикации 13.08.2021.



## ГИДРОГЕОЛОГИ, ИНЖЕНЕРИЙН ГЕОЛОГИ

Судалгааны нийтлэл

<https://doi.org/10.21285/2686-9993-2021-44-3-243-252>



### Хульжийн халуун рашааны ордын нөөцөд үнэлгээ өгөх асуудалд

Дамдин Сурмаажав<sup>a</sup>, Чинбат Ариунаа<sup>b</sup>

<sup>a,b</sup>Монголын гидрогеологичдын холбоо НҮТББ, Улаанбаатар хот, Монгол улс

Холбогдох зохиогч: Сурмаажав Дамдин, surmaajavdamdin@yahoo.com

**Хураангуй.** Монгол Улсын Булган аймгийн нутагт орших Хульжийн халуун рашааны ордын гидрогеологийн эрлийн үе шатны судалгааг анх 1973 онд явуулсан. 1973 оны судалгаанаас хойш өнөөг хүртэл судалгааны ажил хийгдээгүй байсан. Харин 2020–2021 ондуудад Булган аймгийн Засаг даргын санаачлагаар улсын төсвийн хөрөнгөөр Хульжийн рашааны нөөц тогтоох зорилгоор гидрогеологийн ашиглалтын хайгуулын үе шатны судалгааг явуулж, ашиглалтын нөөцийг үйлдвэрлэлийн В зэрэглэлээр анх удаа тооцсон. Тус рашааны ордын геологиструктур, гидрогеохими, гидрогеотермийн горимын онцлогийг илрүүлсэн тухай өгүүлнэ.

**Түлхүүр үг:** үндсэн усажсан хагарал, туслах хагарал, төрөл, үйлдвэрийн зэрэг, ашиглалтын нөөц, халуун рашаан

**Ишлэлийн хувьд:** Сурмаажав Д., Ариунаа Ч. Хульжийн халуун рашааны ордын нөөцөд үнэлгээ өгөх асуудалд. *Nauki o Zemle i nedropol'zovanie = Газарзүйн шинжлэх ухаан ба газрын хэвлийн ашиглалт*. 2021;44(3):243-252. <https://doi.org/10.21285/2686-9993-2021-44-3-243-252>.

## HYDROGEOLOGY AND ENGINEERING GEOLOGY

Original article

### To reserves estimation of Khulj hot spring

Damdin Surmaajav<sup>a</sup>, Chinbat Ariunaa<sup>b</sup>

<sup>a,b</sup>Mongolian Association of Hydrogeologists, Ulaanbaatar, Mongolia

Corresponding author: Damdin Surmaajav, surmaajavdamdin@yahoo.com

**Abstract.** The first prospect evaluation hydrogeological survey of underground mineral thermal waters formed by Khulj hot spring in Bulgan aimag, Mongolia was conducted in 1973. And since then no research has been conducted. However, in 2020–2021, the Governor of Bulgan aimag initiated a hydrogeological exploration study of Khulj spring in order to determine its mineral thermal water resources. The works were funded by the state budget. It was the first time that the mineral thermal water resources of Khulj spring were estimated and classified to the category B in accordance with the degree of geological and hydrogeological study. Conducted exploration works allowed to investigate and specify geological-structural, hydrogeochemical and hydrogeothermal features that determined the formation of the mineral thermal water deposit.

**Keywords:** water-bearing faults, echelon fractures, industrial-genetic type, resources, mineral and thermal waters

**For citation:** Surmaajav D., Ariunaa Ch. To reserves estimation of Khulj hot spring. *Nauki o Zemle i nedropol'zovanie = Earth sciences and subsoil use*. 2021;44(3):243-252. (In Mongolian). <https://doi.org/10.21285/2686-9993-2021-44-3-243-252>.



## ГИДРОГЕОЛОГИЯ И ИНЖЕНЕРНАЯ ГЕОЛОГИЯ

Научная статья  
УДК 553.78(437)

## К вопросу оценки запасов месторождения термальных вод источника Хульж

Дамдин Сурмаажав<sup>а</sup>, Чинбат Ариунаа<sup>б</sup>

<sup>а,б</sup>Монгольская ассоциация гидрогеологов, г. Улан-Батор, Монголия

Автор, ответственный за переписку: Сурмаажав Дамдин, surmaajavdamdin@yahoo.com

**Резюме.** Первые поисково-оценочные гидрогеологические исследования участка минеральных термальных подземных вод, сформированного источником Хульж в аймаке Булган, Монголия, были произведены в 1973 году. С тех пор в течение длительного времени никаких работ не проводилось. Однако в 2020–2021 годах по инициативе губернатора аймака Булган была проведена гидрогеологическая разведка для определения запасов минеральных термальных вод месторождения Хульж. Работы проведены за счет средств государственного бюджета. Впервые сделана оценка запасов минеральных термальных вод месторождения Хульж, которые в соответствии со степенью геолого-гидрогеологической изученности отнесены к категории В. При проведении разведочных работ изучены и детализированы геолого-структурные, гидрогеохимические и гидрогеотермические особенности, предопределившие формирование месторождения минеральных термальных вод.

**Ключевые слова:** обводненные разломы, оперяющие трещины, промышленно-генетический тип, запасы, минеральные, термальные воды.

**Для цитирования:** Сурмаажав Д., Ариунаа Ч. К вопросу оценки запасов месторождения термальных вод источника Хульж // Науки о Земле и недропользование. 2021. Т. 44. № 3. С. 243–252. <https://doi.org/10.21285/2686-9993-2021-44-3-243-252>.

### Оршил

Манай орны халуун, хүйтэн рашааны гидрогеологи, гидрогеохими, гидрогеотерм, бальнеологийн нөхцөлийг судлаж, ард иргэдийн эмчилгээ сувилгаанд хэрэглэхийн зэрэгцээ, рашааны экосистемийн тэнцвэрт байдлыг хадгалах, нөөцийг нь тогтоох, газрын гүний дулааны сэргээгдэх эрчим хүчийг ашиглах явдал чухал байдаг [1–6].

Хульжийн рашаан нь эрт дээр үеээс нутгийн иргэд, гадаадын аянчин, жуулчин, эрдэмтэн мэргэдийн сонирхлыг татсан, эмчил-гээ сувилгаанд өргөн хэрэглэгдэж байсан манай орны алдартай рашаануудын нэг болно.

1927 онд В. А. Смирнов анх удаа Хульжийн халуун рашааны булагт хэмжилт хийж химийн найрлагыг шинжлэн хүхэр-тустөрөгчтэй халуун рашаан болохыг тогтоосон бол В. Н. Попов, Н. А. Маринов нар Хульжийн рашааны орчмын талбайн геолого-гидрогеологийн зургийг зохион, уулс хоорондын хотгорт байдаг гэдгийг тогтоож, тэр хотгорын хэмжээг тооцож босоо тэнхлэгийн дагуу 16 км-т сунасан, 3 км өргөнтэй гэж тогтоосон байна. Е. В. Пиннекер, Г. М. Шпейзер,

Б. И. Писарский нар химийн найрлагыг нарийвчлан судалж цахиурын хүчлийн агуулгыг анх тодорхойлсон [7]. 1974 онд гидрогеологийн эрлийн үе шатны судалгааг доктор З. Нарангэрэлийн удирдлагын дор явуулж халуун рашааны ордын нөөцийг хоногт 328.32 шоо метр хэмжээтэйгээр ашиглах боломжтой гэж үзсэн байдаг [8]. Монгол орны рашааны судалгаа 1990 оноос өнөөг хүртэл бараг хийгдсэнгүй. Харин рашаан сувилалд явж эмчлүүлэгчдийн тоо жилээс жилд өсөн нэмэгдэж байгаа нь манай орны өнөөгийн тулгамдсан асуудлуудын нэг боллоо. Хульжийн халуун рашааны нөөц, шаврын эмчилгээний чанар, нуурын усны балансыг зөв тогтоосноор цаашид рашаан сувиллын томоохон цогцолбор байгуулах суурь судалгаа болно гэж үзэж байна.

### Судалгааны арга, аргачлал

Булган аймгийн Могод сумын төвөөс баруун урагш 2 км зайтай, далайн түвшнээс дээш 1450 м өргөгдсөн өндөр газарт Хульжийн халуун рашааны орд оршино. Могод сум нь аймгийнхаа Сайхан, Орхон, ишиг-Өндөр, Гурван булаг сумуудтай, Архангай



аймгийн Өлзийт сумтай тус тус хил залгах ба Улаанбаатар хотоос баруун зүгт 350 км, Булган аймгийн төв Булган хотоос баруун урагш 158 км, Дашинчилэн сумаас баруун хойш 130 км-ийн зайтай оршдог (Зураг 1).

Хульжийн халуун рашааны ордын нөөцийг өмнө хийсэн судалгааны мэдээллүүдийг ашиглан нэгтгэн дүгнэж, тайлан, материалуудыг цуглуулан суурь мэдээлэл болгон ашигласан бөгөөд халуун рашааны ордод өрөмдсөн гидрогеологийн цооногуудад туршилтын шавхалтыг түвшний хоёр бууралттай хийж нөөцийг гидравликийн аргаар, олборлолтын үйл ажиллагааны ачаалал даах боломжит чадварын дээд хязгаар буюу халуун рашааны байгалийн баялаг [1, 2, 9–11], нөхөн сэлбэгдэх нөөцийг балансын аргаар тооцсон.

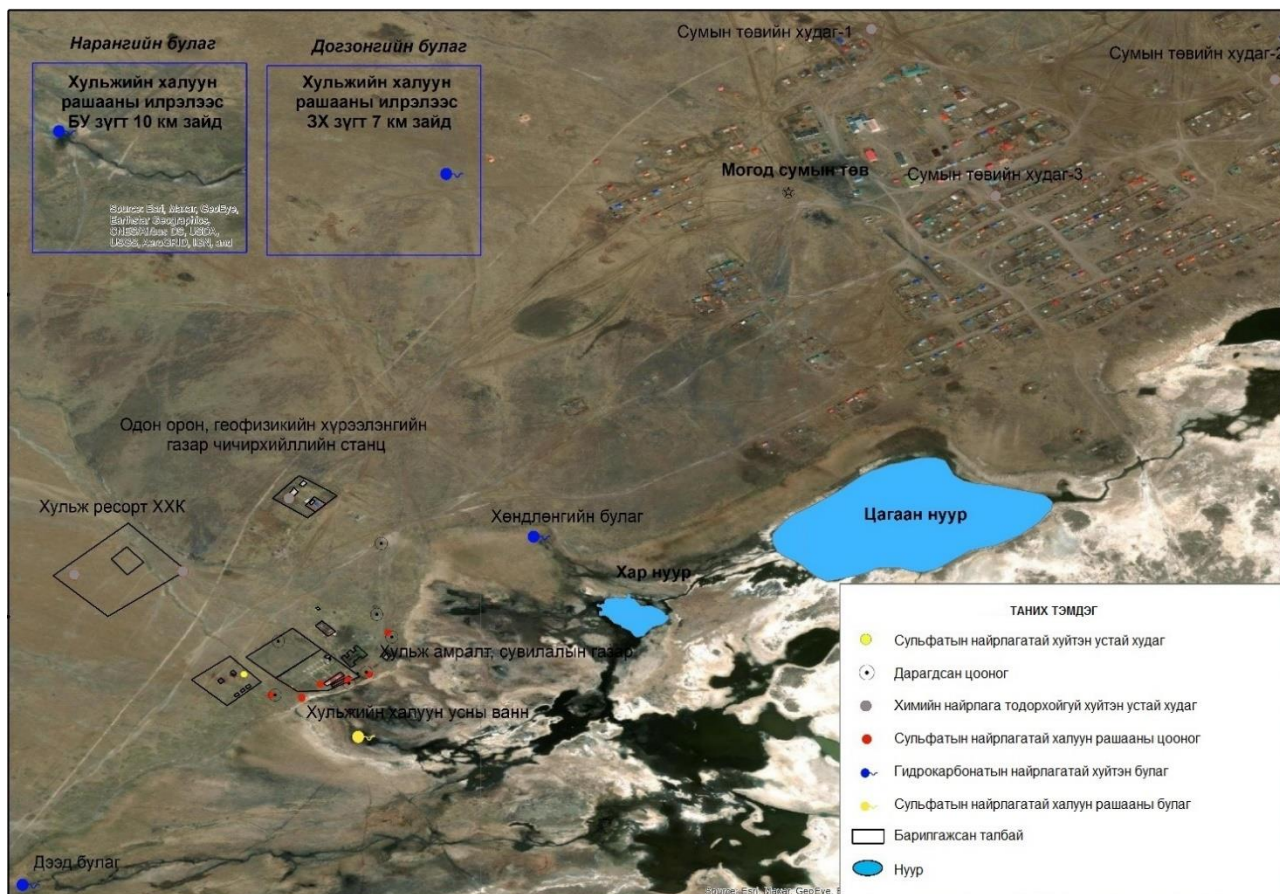
Геологийн 1:50000 хураангуйлалтай зургийг судалгаанд суурь болгон ашигласан ба судалгааны явцад Хульжийн халуун рашааны ордын бүсэд орших халуун, хүйтэн булаг, халуун рашааны илрэл, цооногуудад температур болон ундрагын горимын ажиглалтуудыг хийсэн. Судалгааны талбайд буй уст цэгүүдийн байрлалыг үзүүлэв (Зураг 2). Халуун рашааны тархалтын талбайн хэмжээнд халуун рашаан илэрсэн 6 цооног байгаа ба үүнээс нэг цооногийг мониторингийн болгож тоноглон усны температур болон түвшний өөрчлөлтийн мэдээллүүдийг авч байгаа ба энэхүү судалгааны хүрээнд хяналт шинжилгээний зориулалтаар дахин нэг цооногийг өрөмдөж бэлтгэсэн.



Зураг 1. Судалгааны талбайн байршил

Fig. 1. Location map of the area under investigation (a layout plan)

Рис. 1. Расположение исследуемой территории (ситуационный план)



Зураг 2. Уст цэгүүдийн байрлалын зураг

Fig. 2. Location of water supply facilities

Рис. 2. Расположение объектов водоснабжения

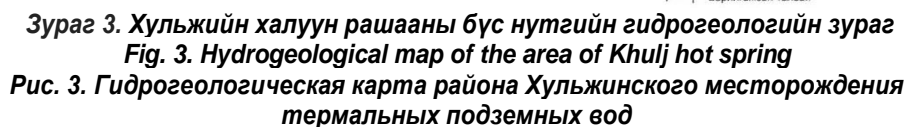
### Судалгааны үр дүн ба хэлэлцүүлэг

**Халуун рашааны ордын гидрогеологийн нөхцөл.** Халуун рашаан илэрч байгаа бүс нутгийн геоморфологийн онцлогийг авч үзэхэд 1967 оны 1 сард Түлээ уулын газар хөдлөлтөөр газрын гадаргууд хойноосоо урагшаа чиглэлтэй 45 км-ийн урт хагарал үүссэнийг Могодын хагарал гэнэ [9, 10, 12]. Могодын хагарал нь Могод сумын зүүн талд өргөн хөндийг үүсгэсэн байх ба Хульжийн халуун рашааны булгаас эх авсан Хульжийн гол урсан Орхон голд цутгадаг. Газар хөдлөлийн идэвхтэй бүс нутаг учраас Хульжийн рашааны үндсэн хагарлыг хөндлөн огтолсон туслах хагарлын огтлолцлолоор халуун ус зөөгдөн гарч ирэх боломжийг үүсгэсэн.

Гидрогеологийн 1:50000 хураангуйлалтай зургийг зохиож дараах уст давхрагуудыг ялган үзүүлэв (Зураг 3). Тухайн талбайд тархсан чулуулгийн ус агуулагч коллектор шинж чанараар нь нүх сүвийн усажсан давхарга, ан цавын усажсан бүс, ан цав-судлын

усажсан хагарал гэж ангилав. Хульжийн халуун рашааны бүс нутгийн хэмжээнд юра-триасын настай дундлаг ба суурилаг найрлагатай бүдэг ягаан, саарал өнгийн андезит, андезит-порфирит тэдний туф, туфбрекч тархсан. Юра-триасын настай бялхмал чулуулаг нь Хульжийн халуун рашааны орчимд дөрөвдөгчийн настай аллюви, аллюви-пролювийн гаралтай сэвсгэр хурдсаар хучигдсан. Аллювийн гаралтай хурдас нь ихэвчлэн Хульжийн голын дагуу хөндийд тархсан бөгөөд элс, хайрга, элсэнцэр, шавранцраас бүрдэх ба хурдасны нийт зузаан 40–60 м. Аллюви-пролювийн гаралтай хурдас нь уулын хормой гуу жалгын хажуу бэлээр жижиг гол горхины гулдрил орчмоор тархах ба элсэнцэр, шавранцар, хайрга болон бул чулуунуудаас тогтоно. Хурдсын нийт зузаан 20-30 м [9, 10]. Аллювийн гаралтай хурдсанд агуулагдах уст давхаргын зузаан дундажаар Хульжийн халуун рашааны орчим 25 м.

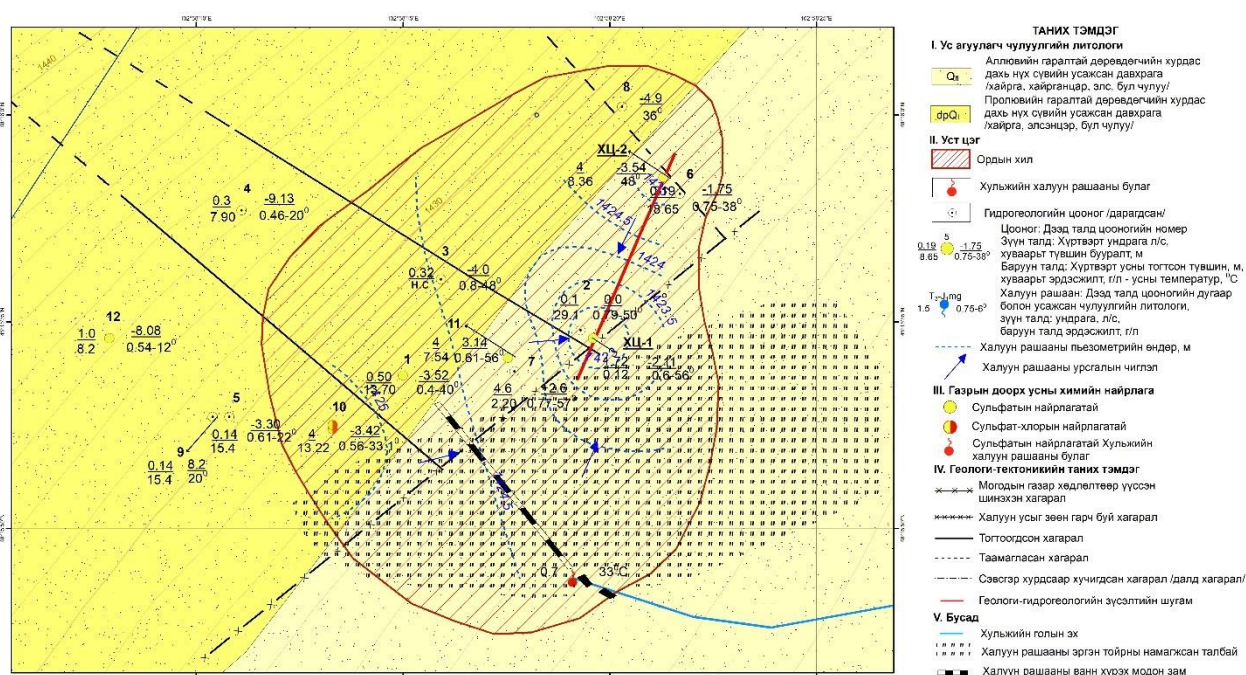




Халуун рашаан нь 6.0–30.0 м-ийн гүнээс дөрөвдөгчийн сэвсгэр хурдсанд илрэх бөгөөд температур нь гүн рүүгээ нэмэгддэг [14, 15]. 2020 онд гаргасан мониторингийн цооногт ус нь 10.0 м-ийн гүнд 43.2 °C, 20.0 м-ийн гүнд 55.6 °C, 30 м-ийн гүнд 55.9 °C, 40 м-ийн гүнд 55.9 °C, 50 м-ийн гүнд 55.8 °C, 60 м-ийн гүнд 55.8 °C температуртай байв.



Зураг 4. Хульжийн халуун рашааны булаг  
Fig. 4. Khulj hot spring – the source of underground thermal waters  
Рис. 4. Источник термальных подземных вод Хульж



Зураг 5. Хульжийн халуун рашааны ордын гидрогеологийн зураг (масштаб 1:2000)  
Fig. 5. Hydrogeological map of Khulj mineral thermal water deposit (scale 1:2000)  
Рис. 5. Гидрогеологическая карта Хульжинского месторождения термальных подземных вод (масштаб: 1:2000)

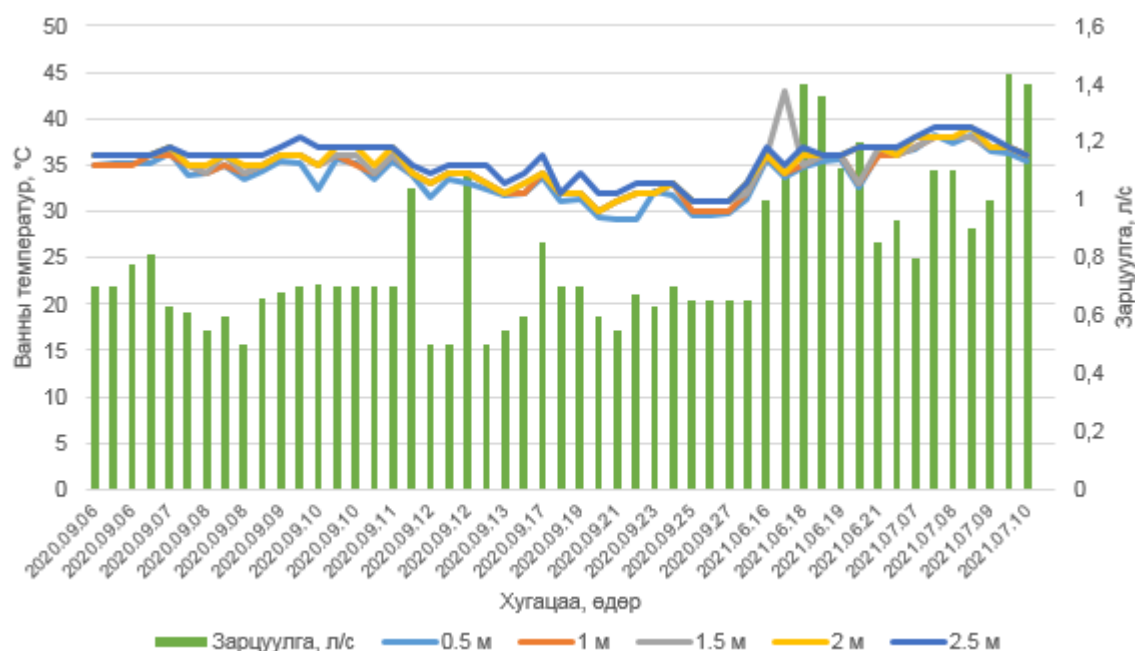
Халуун рашааны химийн найрлага дараах томъёогоор илэрхийлэгдэнэ.

$$M_{0.6} \frac{SO_4 73 Cl 19}{(Na+K) 77 Ca 24} pH 8.12 T^{\circ} 57^{\circ} C.$$

Булгийн эхэнд усны температур 8, 9 дүгээр сард 16.4–26 °С, булгийн урсац нь байгалийн ваннанд ордог. Ваннын гүн нь 2.90 м, өргөн нь 2.50 м, урт нь 2.60 м. Худаг болгон ухаж модоор доторлон хашлага хийсэн.

5 дугаар сард худгийг лайдаж цэвэрлэж ашиглалтад бэлтгэдэг ба худагт халуун рашааны усны температурыг 8, 9 дүгээр сард хэмжиж үзэхэд 0.5 м-ийн гүнд 31–34 °С, 1.0 м-ийн гүнд 32–34 °С, 1.5 м-ийн гүнд 35–36 °С, 2.0 м-ийн гүнд 36–39 °С, 2.9 м-ийн гүнд 36.8–37.5 °С байлаа (Зураг 6). Худгаас гарах урсацын хэмжээ 0.7 л/с.





**Зураг 6. Хульжийн халуун рашааны усанд ордог ванны доторх усны температурын горимын үзүүлэлт**  
Ажиглалт хийсэн хугацаа: 2020.06.09 – 2021.07.10

**Fig. 6. Diagram of the temperature regime of water in the bath of Khulj hot spring**

Observation period: from June 9, 2020 to July 10, 2021

**Рис. 6. Диаграмма температурного режима воды в ванне Хульжинского горячего источника**

Период наблюдения: 9 июня 2020 г. – 10 июля 2021 г.

Өгөршлийн бүс дэх ан цавын (гүн бүс) хягарлуудтай холбоотойгоор халуун рашааны ордоос 1-9 км-ийн зайтай хүйтэн устай булгууд илэрдэг. Халуун рашааны ордоос 300.0 м-ийн зайд байрлах Хөндлөнгийн булагт усны температур 4.7 °C, ундарга нь 0.7 л/с, эрдэсжилт багатай цэнгэг устай. Судалгааны талбайд байрлах хүйтэн устай уст цэгүүд ихэнх нь үндсэн чулуулагт байрлах ба усн температур 4–7 °C. Халуун рашааны булгаас ойролцоогоор 200 м зайд байрлах иргэн Ариунаагийн хашаанд өрөмдсөн худгийн гүн 18 м, худгийн усны температур 15 м-ийн гүнд 11.5 °C бөгөөд бид тус цооногт сорилын шавхалт хийхэд температур нэмэгдэн 11.8–12 °C хүртэл нэмэгдэж байсан [16].

Хульжийн халуун рашааны орд нь химийн найрлагын хувьд онцгой нэг төрөлд хамрагдаж Монгол улсын халуун рашааны ангиллын нэг төлөөлөл болдог [17, 18]. Сульфат-натрийн агуулгатай, бага эрдэсжилттэй, өндөр температуртай, шүлтлэг чанартай, цахиурлаг устай халуун рашааныг Хульжийн бие даасан төрөл үүсгэдэг [14, 19]. Хульжийн халуун рашааны найрлага 90-ээд жилийн хугацаанд гол анион, катионы агуулга өөрчлөгдөөгүй байна. Гэхдээ цахиурын

хүчлийн агуулга  $H_2SiO_3$  1974 онд өмнөх онуудынхаас 2 дахин бага байсан. Бидний судалгааны хүрээнд хийгдсэн шинжилгээнд 1974 оноос өмнөх онуудын хийгдсэн шинжилгээний дүнтэй ижил агуулгатай байна.

**Халуун рашааны нөөц тооцсон байдал.** Хульжийн халуун рашааны ордын талбай 400 × 150 м. Тус талбайн хэмжээнд 1974, 2016, 2019, 2020 онуудад 15–202.6 м-ийн гүнтэй гидрогеологийн эрэл-хайгуулын 14 цооног, мониторингийн 2 цооног өрөмдөж тоногдсон [20]. Ашиглалтын 4 цооногт 24-72-120 цагийн түвшний хоёр бууралттай туршилтын шавхалт хийж, ерөнхий хими, бактериологи, цацраг идэвхит бодис, хүнд металлын агуулгыг мэргэжлийн лабораториудад тодорхойлж дүгнэлт гаргасан. Хульжийн рашаан сувиллын худгийг 3 л/с-ийн ундаргатайгаар (1974 он), Хульж ресортын худгийг 1.0 л/с-ийн ундаргатайгаар (2016 он), хайгуулашиглалтын худгийг 1.8 л/с-ийн ундаргатайгаар (2020 он)-ийн ундаргатайгаар ашиглах бөгөөд тус ордын хэмжээнд гидравликийн аргаар рашааны ашиглалтын нөөцийг тооцож үйлдвэрлэлийн В зэрэглэлээр хоногт 501.12 шоо метр хэмжээгээр авч ашиглах боломжтой.



### Дүгнэлт

Хульжийн халуун рашаан нь Хангайн шинэхэн өргөгдлийн хэсэгт газар хөдлөлийн идэвхитэй бүсэд байдаг азотат, сул эрдэсжсэн, цахиурлаг халуун рашаан бөгөөд химийн найрлагаараа сульфат-натрийн бүлэгт багтдаг учир түүнийг Хульжийн төрөл гэж онцгойлон ангилдаг. Структур гидрогеологийн судалгааны үүднээс авч үзвэл халуун рашааны орд нь триас-юрийн настай андезит порфир, андезит базальт болох үндсэн чулуулгийн дээд хэсэгт сэвсгэр хурдсаар хучигдсан хоёр дахь орчинд бөмбөгөр гадаргуу үүсгэж тогтсон далд ан цав-судлын халуун рашааны орд болно.

1974–1975 онд гидрогеологийн судалгааны ажлыг хийж, тус халуун рашааны ордыг олж илрүүлээд тухайн халуун рашааны

нөөцийг 202.6 м-ийн гүнээс оргилон гарах даралттай усны undаргаар ашиглаж болох таамаг нөөцийг хоногт 397.4 шоо метр гэж тооцсон.

2020–2021 онд хийсэн судалгаагаар халуун рашааны ашиглалтын нөөцийг үйлдвэрлэлийн В зэрэглэлээр хоногт 501.12 шоо метр ашиглаж болохыг бид тооцоолов.

Дээр дурдсан судалгааны үр дүнг үндэслэн дараахь дүгнэлтийг хийж болно:

1. Хульжийн халуун рашааны ордын хэлбэр, хэмжээг нарийвчлан тодорхойлж зураглаж өглөө.

2. Хульжийн халуун рашааны ордын ашиглалтын нөөцийг анх удаа үйлдвэрлэлийн В зэрэглэлээр хоногт 501.12 шоо метр ашиглах боломжтой гэж тооцоолов.

### References

1. Lkhagvademberel Enkh-Amgalan Sankhuuch, Golovina E. I. Features and problems of groundwater production in Mongolia. Aktual'nye voprosy sovremennoi nauki. 2018;1:69-74. (In Russ.).
2. Namnandorj O., Tseren Sh., Nyamdorj O. *The mineral water of the Mongolian People's Republic*. Ulaanbaatar: State Press Service Committee; 1966. 467 p. (In Mongolian).
3. Nambar B., Tuya G., Onon G. Current status and prospects of spa-resort business in Mongolia. *Kurortnaya baza i prirodnye lechebno-ozdorovitel'nye mestnosti Tuvy i sopredel'nykh regionov*. 2015;2:11-13. (In Russ.).
4. Bolormaa Ch., Bolormaa O., Buyannemekh Z. Physical and chemical properties of hot springs in western regions of Mongolia. *Kurortnaya baza i prirodnye lechebno-ozdorovitel'nye mestnosti Tuvy i sopredel'nykh regionov*. 2015;2:128-130. (In Russ.).
5. Pinneker E. V., Pisarskii B. I., Pavlova S. E., Lepin V. S. Isotopic studies of mineral waters in Mongolia. *Geologiya i geofizika*. 1995;36(1):94-102. (In Russ.).
6. Posokhov E. V., Tolstikhin N. I. *Mineral waters (medicinal, industrial, energetic)*. Leningrad: Nedra; 1977. 240 p. (In Russ.).
7. Romanov V. V., Efimova D. V., Vlasova L. S., Tserendorzh Z. Tritium-based study of groundwater in Central and Eastern Mongolia. *Vodnye resursy*. 1989;6:17–26. (In Russ.).
8. Pisarskii B. I., Ganchimeg D. *Gas composition of underground mineral water in Mongolia*. Irkutsk: Institute of the Earth's Crust, Siberian Branch of the Russian Academy of Sciences; 2007. 106 p. (In Russ.).
9. Batsukh H. *Hydrogeology*. Ulaanbaatar: Mongolian University of Science and Technology; 2012. 275 p. (In Mongolian).
10. Batsukh H. *Applied hydrogeology*. Ulaanbaatar: Mongolian University of Science and Technology; 2011. 220 p. (In Mongolian).
11. Marinov N. A., Popov V. A. *Hydrogeology of the Mongolian People's Republic*. Moscow: Gostekhizdat; 1963. 451 p. (In Russ.).
12. Molnar P., Tapponier P. Cenozoic tectonics of Asia: effects of Continental Collision: features of recent continental tectonics in Asia can be interpreted as results of the India-Eurasia collision. *Sciences*. 1975;189(4201): 419-426. <https://doi.org/10.1126/science.189.4201.419>.
13. Windley B. F., Allen M. B. Mongolian plateau: evidence for a late Cenozoic mantle plume under central Asia. *Geology*. 1993;21(4):295-298. [https://doi.org/10.1130/0091-7613\(1993\)021<0295:MPEFAL>2.3.CO;2](https://doi.org/10.1130/0091-7613(1993)021<0295:MPEFAL>2.3.CO;2).
14. Khutorskoi M. D., Golubev V. A., Kozlovseva S. V., et al. *Thermal regime of the Mongolian People's Republic subsoil*. Moscow: Nauka; 1991. 126 p. (In Russ.).
15. Fournier R. O., Rowe J. J. Estimation of underground temperatures from the silica content of water from hot springs and wet-steam wells. *American Journal of Science*. 1966;264(9):685-697. <https://doi.org/10.2475/ajs.264.9.685>.
16. Surmaazhav D. Thermal energy resources of thermal waters of Central Mongolia. *Uspekhi sovremenogo estestvoznaniya = Advances in current natural sciences*. 2020;9:106-112. (In Russ.). <https://doi.org/10.17513/use.37479>.
17. Surmaazhav D. Distribution features of thermal water in the faults of Mongolia. In: *Materialy nauchnoi konferentsii mezhvuzovskoi Kerulenskoi geologicheskoi ekspeditsii = Materials of the scientific conference of the interuniversity Kerulen geological expedition*. Ulaanbaatar; 2017. p.198–200. (In Russ.).



18. Surmaazhav D. Formation conditions of thermal waters in Mongolia. In: *Podzemnye vody Vostoka Rossii: Materialy XXII Vserossiiskogo soveshchaniya po podzemnym vodam Sibiri i Dal'nego Vostoka s mezhdunarodnym uchastiem = Underground waters of Eastern Russia: materials of the 22<sup>nd</sup> All-Russian meeting on the underground waters of Siberia and the Far East with international participation*. Novosibirsk, 2018. p.464–468. (In Russ.).

19. Truesdell A. H. Geochemical techniques in exploration. *Proceedings of the 2<sup>nd</sup> United Nations Symposium*

*on the Development and Use of Geothermal Resources*. 1976;1:53-79.

20. Surmaajav D., Vakhromeev A. G., Tolkachev G. M., Sverkunov S. A., Martynov N. N., Zalinin V. G. Construction and technology of drilling wells in difficult mining and geological conditions for the purpose of thermal waters producing. *Vestnik Permskogo natsional'nogo issledovatel'skogo poli-tehnicheskogo universiteta. Geologiya. Neftgazovoe i gornoe delo*. 2019;19 (4):335-343. <https://doi.org/10.15593/2224-9923/2019.4.3>. (In Russ.).

### Список источников

1. Лхагвадэмбэрэл Энх-Амгалан Санхууч, Головина Е. И. Особенности и проблемы добычи подземных вод на территории Монголии // Актуальные вопросы современной науки. 2018. № 1. С. 69–74.

2. Намнандорж О., Цэрэн Ш., Нямдорж О. Бугд Найрамдах Монгол Ард Улсын рашаан. Улаанбаатар: Улсын хэвлэлийн албаны хороо, 1966. 467 х.

3. Намбар Б., Туяа Г., Онон Г. Современное состояние и перспективы санаторно-курортного дела в Монголии // Курортная база и природные лечебно-оздоровительные местности Тувы и сопредельных регионов. 2015. № 2. С. 11–13.

4. Bolormaa Ch., Bolormaa O., Buyannemekh Z. Physical and chemical properties of hot springs in western regions of Mongolia // Курортная база и природные лечебно-оздоровительные местности Тувы и сопредельных регионов. 2015. № 2. С. 128–130.

5. Пиннекер Е. В., Писарский Б. И., Павлова С. Е., Лепин В. С. Изотопные исследования минеральных вод Монголии // Геология и геофизика. 1995. Т. 36. № 1. С. 94–102.

6. Посохов Е. В., Толстихин Н. И. Минеральные воды (лечебные, промышленные, энергетические). Л.: Недра, 1977. 240 с.

7. Романов В. В., Ефимова Д. В., Власова Л. С., Цэрэндорж З. Исследование подземных вод Центральной и Восточной Монголии с помощью трития // Водные ресурсы. 1989. № 6. С. 17–26.

8. Писарский Б. И., Ганчимэг Д. Газовый состав подземных минеральных вод Монголии. Иркутск: Изд-во ИЗК СО РАН, 2007. 106 с.

9. Батсух Н. Гидрогеологи. Улаанбаатар: ШУТИС, 2012. 275 х.

10. Батсух Н. Хавсарга гидрогеологи. Улаанбаатар: ШУТИС, 2011. 220 х.

11. Маринов Н. А., Попов В. А. Гидрогеология Монгольской Народной Республики. М.: Гостехиздат, 1963. 451 с.

12. Molnar P., Tapponier P. Cenozoic tectonics of Asia: effects of Continental Collision: features of recent continental tectonics in Asia can be interpreted as results of the India-Eurasia collision // *Sciences*. 1975.

Vol. 189. Iss. 4201. P. 419–426. <https://doi.org/10.1126/science.189.4201.419>.

13. Windley B. F., Allen M. B. Mongolian plateau: evidence for a late Cenozoic mantle plume under central Asia // *Geology*. 1993. Vol. 21. Iss. 4. P. 295–298. [https://doi.org/10.1130/0091-7613\(1993\)021<0295:MPEFAL>2.3.CO;2](https://doi.org/10.1130/0091-7613(1993)021<0295:MPEFAL>2.3.CO;2)

14. Хуторской М. Д., Голубев В. А., Козловцева С. В. [и др.]. Тепловой режим недр МНР. М.: Наука, 1991. 126 с.

15. Fournier R. O., Rowe J. J. Estimation of underground temperatures from the silica content of water from hot springs and wet-steam wells // *American Journal of Science*. 1966. Vol. 264. Iss. 9. P. 685–697. <https://doi.org/10.2475/ajs.264.9.685>.

16. Сурмаажав Д. Теплоэнергетические ресурсы термальных вод Центральной Монголии // Успехи современного естествознания. 2020. № 9. С. 106–112. <https://doi.org/10.17513/use.37479>.

17. Сурмаажав Д. Особенности распределения термальных вод в разломах Монголии // Материалы науч. конф. межвузовской Керуленской геологической экспедиции. Улаанбаатар, 2017. С. 198–200.

18. Сурмаажав Д. Условия формирования термальных вод Монголии // Подземные воды Востока России: материалы XXII Всерос. совещ. по подземным водам Сибири и Дальнего Востока с междунар. уч. Новосибирск, 2018. С. 464–468.

19. Truesdell A. H. Geochemical techniques in exploration // *Proceedings of the 2<sup>nd</sup> United Nations Symposium on the Development and Use of Geothermal Resources*. 1976. Vol. 1. P. 53–79.

20. Сурмаажав Д., Вахромеев А. Г., Толкачев Г. М., Сверкунов С. А., Мартынов Н. Н., Заливин В. Г. Конструкция и технология бурения скважин в сложных горно-геологических условиях с целью добычи термальных вод // Вестник Пермского национального исследовательского политехнического университета. Геология. Нефтегазовое и горное дело. 2019. Т. 19. № 4. С. 335–343. <https://doi.org/10.15593/2224-9923/2019.4.3>.





## Зохиогчдын талаархи мэдээлэл / Information about the authors / Информация об авторах



**Сурмаажав Дамдин,**  
гүйцэтгэх захирал,  
Монголын гидрогеологичдын холбоо НҮТББ,  
Улаанбаатар хот, Монгол улс,  
surmaajavdamdin@yahoo.com.

**Damdin Surmaajav,**  
Executive Director,  
Mongolian Association of Hydrogeologists,  
Ulaanbaatar, Mongolia,  
surmaajavdamdin@yahoo.com.

**Сурмаажав Дамдин,**  
исполнительный директор,  
Монгольская ассоциация гидрогеологов,  
г. Улан-Батор, Монголия,  
surmaajavdamdin@yahoo.com.



**Ариунаа Чинбат,**  
гидрогеологич инженер,  
Монголын гидрогеологичдын холбоо НҮТББ,  
Улаанбаатар хот, Монгол улс,  
ariunaa444.chinbat@gmail.com.

**Chinbat Ariunaa,**  
Hydrogeologist Engineer,  
Mongolian Association of Hydrogeologists,  
Ulaanbaatar, Mongolia,  
ariunaa444.chinbat@gmail.com.

**Ариунаа Чинбат,**  
инженер-гидрогеолог,  
Монгольская ассоциация гидрогеологов,  
г. Улан-Батор, Монголия,  
ariunaa444.chinbat@gmail.com.

## Зохиогчдын оруулсан хувь нэмэр / Contribution of the authors / Вклад авторов

Нийтлэлийг бэлтгэхэд бүх зохиолчид ижил хувь нэмэр оруулсан.

The authors contributed equally to this article.

Все авторы сделали эквивалентный вклад в подготовку публикации.

## Ашиг сонирхлын зөрчил / Conflict of interests / Конфликт интересов

Зохиогчид ашиг сонирхлын зөрчилгүй гэж мэдэгджээ.

The authors declare no conflicts of interests.

Авторы заявляют об отсутствии конфликта интересов.

*Бүх зохиогчид эцсийн гар бичмэлийг уншиж, батлав.*

*The final manuscript has been read and approved by all the co-authors.*

*Все авторы прочитали и одобрили окончательный вариант рукописи.*

## Нийтлэлийн тухай мэдээлэл / Information about the article / Информация о статье

Нийтлэлийг редакторууд хүлээж авсан 10.06.2021; хянасны дараа зөвшөөрсөн 15.07.2021; хэвлэлд хүлээн зөвшөөрсөн 19.08.2021.

The article was submitted 10.06.2021; approved after reviewing 15.07.2021; accepted for publication 19.08.2021.

Статья поступила в редакцию 10.06.2021; одобрена после рецензирования 15.07.2021; принята к публикации 19.08.2021.



Научная статья

УДК 556.332.629

<https://doi.org/10.21285/2686-9993-2021-44-3-253-260>



## Неотектонические условия формирования и локализация запасов подземных вод переуглубленных участков долины реки Китой

Анна Игоревна Кураничева<sup>а</sup>, Юрий Константинович Ланкин<sup>б</sup>, Ольга Олеговна Наумова<sup>с</sup>

<sup>а-с</sup>АО «Урангеологоразведка» АО «Росгеология», Ангарская экспедиция, г. Иркутск, Россия

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

Автор, ответственный за переписку: Кураничева Анна Игоревна, [kuranicheva.ai@mail.ru](mailto:kuranicheva.ai@mail.ru)

**Резюме.** Цель настоящего исследования заключалась в выявлении основных неотектонических особенностей формирования переуглубленных долин, где происходит локализация пресных подземных вод. Объектом и предметом исследования стало Китойское месторождение питьевых подземных вод, расположенное в переуглубленной долине р. Китой, сложенной констративным аллювием, гидрогеологические и гидрогеохимические условия данного месторождения. Исследование переуглубленной аллювиальной дислокации выполнено на основании анализа работ, осуществленных за период с 1956 по 2020 гг. на Китойском месторождении пресных подземных вод, расположенном на южной оконечности Сибирской платформы в пределах Иркутско-Черемховской равнины. В ходе работы было изучено происхождение дислокации, образованной пересечением волн погружений и опусканий байкальского и саянского направлений, сопровождающихся локализацией подземных вод. Описываемая переуглубленная долина имеет мощность 9–39 м, представлена валуно-гравийно-галечниковым материалом с песчаным заполнителем. Средний коэффициент фильтрации по месторождению равен 122 м/сут., средний коэффициент водопроводимости – 3400 м<sup>2</sup>/сут., за его пределами показатели уменьшаются. Качественный состав подземных вод удовлетворяет стандартам, но на некоторых участках возможна повышенная минерализация, высокое содержание железа и марганца, обусловленное подтоком подземных вод из низзалегających юрских водоносных горизонтов. Авторами выполнено обобщение изменения эффективной мощности водоносного горизонта и анализ благоприятных условий для формирования пресных подземных вод в пределах депрессионной структуры с целью хозяйственно-питьевого водоснабжения населения.

**Ключевые слова:** Китойское месторождение питьевых подземных вод, переуглубленные участки долины реки Китой, констративный аллювий

**Для цитирования:** Кураничева А. И., Ланкин Ю. К., Наумова О. О. Неотектонические условия формирования и локализация запасов подземных вод переуглубленных участков долины реки Китой // Науки о Земле и недропользование. 2021. Т. 44. № 3. С. 253–260. <https://doi.org/10.21285/2686-9993-2021-44-3-253-260>.

Original article

## Neotectonic formation and localization conditions of groundwater reserves in over-deepened sections of the Kitoy River valley

Anna I. Kuranicheva<sup>а</sup>, Yuri K. Lankin<sup>б</sup>, Olga O. Naumova<sup>с</sup>

<sup>а-с</sup>JSC Urangeo of JSC Rosgeo, Angarsk Expedition, Irkutsk, Russia

<sup>а</sup>Institute of the Earth's Crust, Siberian Branch of the Russian Academy of Sciences, Irkutsk, Russia

Corresponding author: Anna I. Kuranicheva, [kuranicheva.ai@mail.ru](mailto:kuranicheva.ai@mail.ru)

**Abstract.** The purpose of the study is to identify the main neotectonic formation features of over-deepened valleys where fresh groundwater is localized. The object and the subject of the study is the Kitoy deposit of drinking groundwater located in the U-shape valley of the Kitoy river, which is composed of constrictal alluvium, as well as hydrogeological and hydrogeochemical conditions of the deposit. The study of the over-deepened alluvial dislocation is carried out based on the analysis of the works performed at the Kitoy fresh groundwater deposit for the period from 1956 to 2020. The deposit is located at the southern margin of the Siberian platform within the Irkutsk-Cheremkhovo plain. The article studies the origin of the

© Кураничева А. И., Ланкин Ю. К., Наумова О. О., 2021



dislocation formed by the intersection of waves of pitching and subsidence of the Baikal and Sayan directions accompanied by the groundwater localization. The described over-deepened valley is 9-39 m thick. It is represented by boulder-gravel-pebble material with sandy aggregate. The average filtration coefficient for the deposit is 122 m/day, the average water permeability coefficient is 3400 m<sup>2</sup>/day, whereas beyond its limits the indicators decrease. The qualitative composition of groundwater meets the standards, but some areas feature increased mineralization, high content of iron and manganese due to the inflow of groundwater from the underlying Jurassic aquifers. The authors made a generalization on the variations of the effective thickness of the aquifer and analyzed the favorable conditions for the formation of fresh groundwater within the depression structure for the purpose of water supply for drinking and household uses.

**Keywords:** Kitoi portable groundwater deposit, over-deepened sections the Kitoi river valley, constrictal alluvium

**For citation:** Kuranicheva A. I., Lankin Y. K., Naumova O. O. Neotectonic formation and localization conditions of groundwater reserves in over-deepened sections of the Kitoi River valley. *Nauki o Zemle i nedropol'zovanie = Earth sciences and subsoil use*. 2021;44(3):253-260. (In Russ.). <https://doi.org/10.21285/2686-9993-2021-44-3-253-260>.

## Введение

Современное водоснабжение населения г. Ангарска осуществляется за счет поверхностных вод р. Ангары, которые испытывают высокую антропогенную нагрузку и подвержены загрязнению. Выше города по течению реки расположены различные предприятия и городская агломерация г. Иркутска, что является причиной постоянного ухудшения качества поверхностных вод. В маловодные годы уровень реки сильно падает до такой степени, что частично оголяется оголовок водозабора. Такие случаи наблюдались в 2017–2019 гг. Этот факт может вызвать в определенные периоды прекращение добычи воды. Особенно опасно прекращение поставки воды в систему водоснабжения города в зимний период, так как это может вывести ее из строя и послужить основанием для возникновения чрезвычайной ситуации. Поэтому для хозяйственно-питьевого водоснабжения населения г. Ангарска нужен надежный источник воды с хоро-

шим качеством, не подверженный загрязнению. Таким источником является Китойское месторождение питьевых подземных вод [1, 2].

Общая величина разведанных и оцененных по тринадцати участкам запасов подземных вод в районе г. Ангарска составляет 223,929 тыс. м<sup>3</sup>/сут. (таблица).

Большая часть участков (восемь из тринадцати) разведана по результатам эксплуатации действующих небольших водозаборов и используется недропользователями для водоснабжения конкретных водопотребителей. Сумма этих запасов составляет всего 16,229 тыс. м<sup>3</sup>/сут. Наиболее перспективным источником питьевого и хозяйственного водоснабжения г. Ангарска является Китойское месторождение питьевых подземных вод.

К данному месторождению питьевых подземных вод относятся пять участков, из них четыре (Нижекитойский-1, Зорикитойский, Золотниковский, Верхнекитойский-1) выделены в пределах Китойского месторождения

## Месторождения питьевых подземных вод, разведанные в районе г. Ангарска

### Portable groundwater deposits explored in the area of the city of Angarsk

Название месторождения подземных вод (МПВ)	Запасы подземных вод, тыс. м <sup>3</sup> /сут.
Китойское МПВ, Нижнекитойский-1 участок МПВ	35,567
Китойское МПВ, Зорикитойский участок МПВ	0,016
Китойское МПВ, Золотниковско-китойский участок МПВ	0,017
Китойское МПВ, Верхнекитойский-1 участок МПВ	53,4
Китойское МПВ, Второй участок МПВ	118,7
Космонавтское МПВ	0,3
Одинское МПВ	6,5
Малоеловский участок МПВ	0,174
Юго-Восточное МПВ	0,726
Суховское МПВ, Суховский-1 участок МПВ	0,8
НПС-Ангарское МПВ	0,044
Звездный участок МПВ	0,285
Савватеевское МПВ	7,4
Итого	223,929



в 2014 г. Его запасы составляют 207,667 тыс. м<sup>3</sup>/сут., еще 80 тыс. м<sup>3</sup>/сут. исключены из государственного баланса, так как по ним невозможно организовать зоны санитарной охраны.

### Материалы и методы исследования

Месторождение расположено в предгорной части долины р. Китой в 16 км западнее г. Ангарска (рис. 1). Локализация ресурсов пресных подземных вод на данном участке недр связана с особенностями неотектонического развития рассматриваемой территории.

Истоки р. Китой начинаются в горноскладчатой зоне Саянского хребта. Затем долина выходит на южную оконечность Сибирской платформы и в пределах Иркутско-Черемховской равнины сливается с долиной р. Ангары.

Согласно С. С. Воскресенскому и М. Г. Гроссвальду, вдоль предгорья Саян выделяется две зоны современного (неотектонического) прогибания, простирающиеся параллельно подножию Восточного Саяна. Это Бельская и Ангарская зоны. Китойское место-

рождение питьевых подземных вод расположено в пределах Бельской неотектонической зоны. Она проходит от р. Олхи через средние течения Иркуты, Китоя, Большой и Малой Бель до наибольшего расширения долин р. Оки и Зимы. Ангарская зона простирается примерно вдоль линии городов Иркутск – Черемхово – Залари – Зима. Для обеих зон в долинах рек с наибольшим неотектоническим опусканием характерно широкое развитие пойм, низких надпойменных речных и озерных террас с формированием на многих участках толщ констративного аллювия (переуглубленные участки долин с вложенными террасами), где происходит локализация подземных вод. Зоны опусканий разделены пологим волнообразным поднятием, где преимущественно распространен генетически перстративный аллювий небольшой мощности. Шарниры зон несколько раз погружаются и воздымаются, что связано с наличием волн погружений и опусканий, параллельных хребтам байкальского направления и пересекающих саянское направление почти под прямым

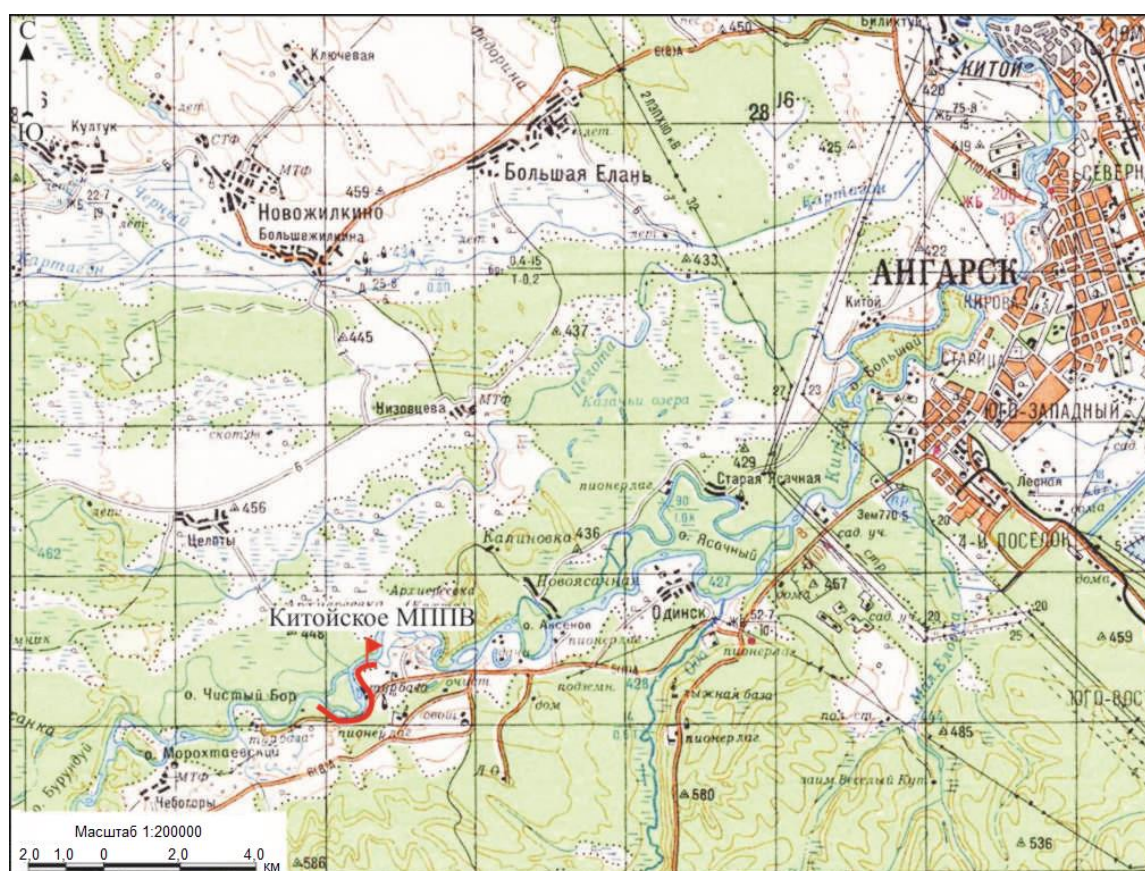


Рис. 1. Схема расположения Китойского месторождения подземных вод  
Fig. 1. Location map of the Kitoy groundwater deposit





углом. Эти две системы волновых движений при взаимодействии создали своеобразную решетчатую морфоструктуру Иркутско-Черемховской равнины (рис. 2).

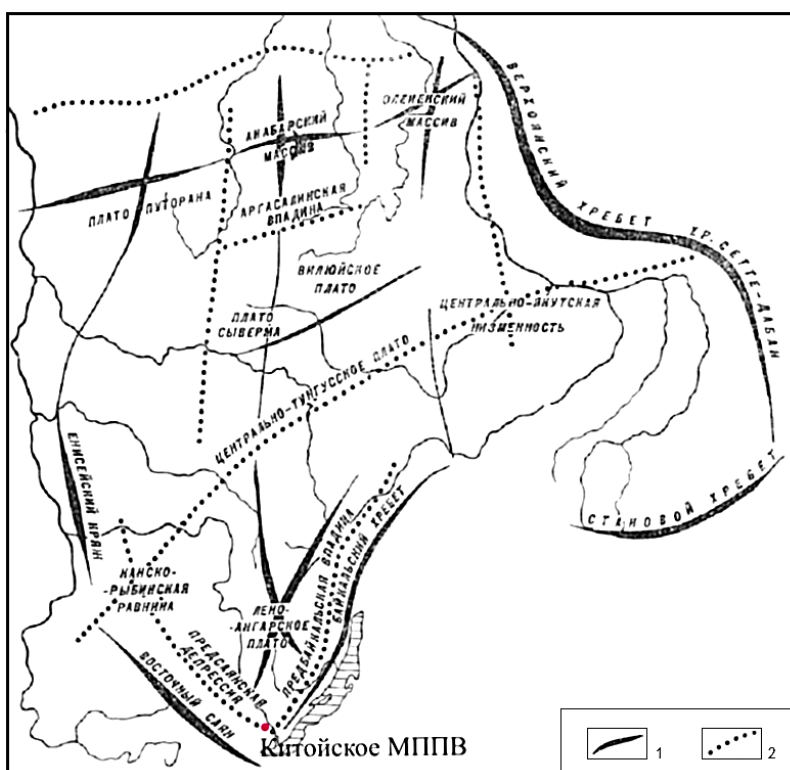
### Результаты исследования и их обсуждение

В местах пересечения зон опусканий саянского и байкальского направлений образуются наибольшие кайнозойские депрессии: Зиминско-Окинская, Среднебельская, Китойская и другие [3–6]. Китойское месторождение приурочено к одному из переуглубленных участков долины р. Китой, сложенных констративным аллювием мощностью от 9 до 39 м, представленным валуно-гравийно-галечниковым материалом с песчаным заполнителем, имеющим высокие фильтрационные показатели (рис. 3, 4). Кратное увеличение эффективной мощности водоносного горизонта в пределах депрессионной структуры сформировало особо благоприятные условия

для локализации пресных подземных вод, которые позволяют вести водоотбор из скважин в усиленном режиме<sup>1</sup> [1, 7–16].

Рассматриваемый участок недр расположен вблизи предгорья Саян, откуда направлен мощный подземный сток, который локализуется в волновых депрессиях Бельской зоны, за счет чего сформировано Китойское месторождение питьевых подземных вод [17, 18]. Воды бывают не только пресные по составу, но и – далее от Присаянья – соленые, так как там происходит разгрузка соленых, солоноватых вод нижележащих юрских водоносных горизонтов, что согласуется с данными гидрохимии геоэкологических исследований и картографирования масштаба 1:200000.

Граница между неогеновыми и четвертичными отложениями проводится условно. В толще неогеновых отложений нельзя выделить отдельные водоносные горизонты, можно лишь отметить ряд особенностей, свойственных данному комплексу [19, 20].



**Рис. 2. Волны Мезозойско-Кайнозойских поднятий (1) и опусканий (2), под влиянием которых были оформлены главные особенности морфоструктуры Восточно-Сибирской возвышенной платформенной равнины (по О. М. Адаменко, 1971)**

**Fig. 2. Waves of Mesozoic-Cenozoic uplifts (1) and subsidence (2) under the influence of which the main morphostructural features of the East Siberian elevated platform plain were formed (according to O. M. Adamenko, 1971)**

<sup>1</sup> Климентов П. П., Богданов Г. Я. Общая гидрогеология: учебник для вузов. М.: Недра, 1977. 357 с.





Рис. 3. Гидрогеологическая карта Китойского месторождения питьевых подземных вод  
Fig. 3. Hydrogeological map of the Kitoy potable groundwater deposit

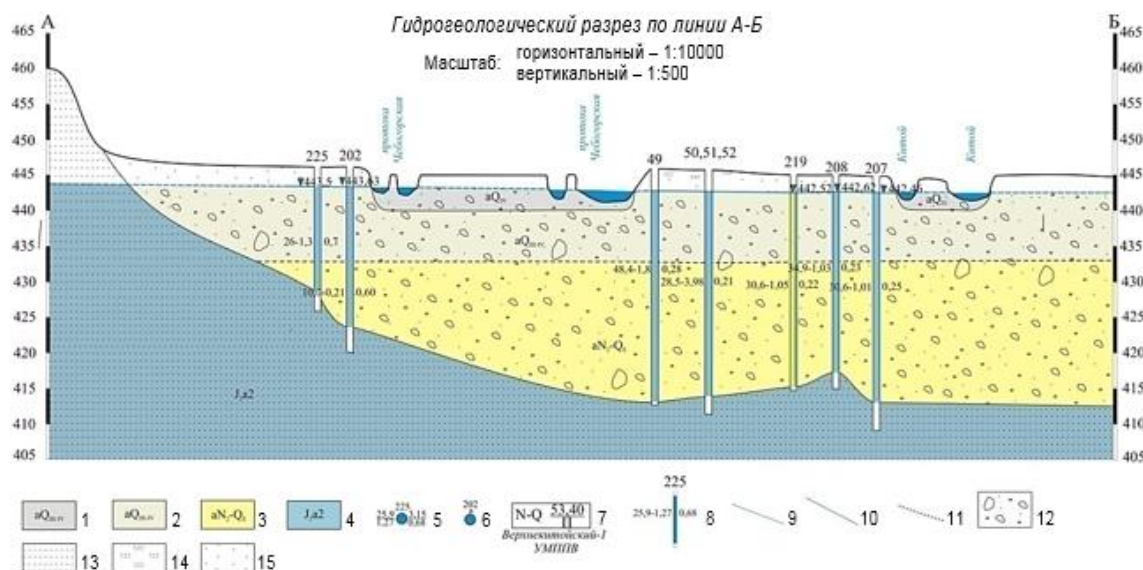


Рис. 4. Гидрогеологический разрез Китойского месторождения питьевых подземных вод:

- 1 – водоносный горизонт современных аллювиальных отложений (валуны, галечники, пески); 2 – водоносный горизонт современных верхнечетвертичных аллювиальных отложений (галечники, пески, гравий); 3 – водоносный горизонт неоген-четвертичных аллювиальных отложений; 4 – второй водоносный ааленский комплекс (песчаники); 5 – гидрогеологическая скважина: вверху – номер скважины; слева в числителе – дебит, л/сут., в знаменателе – понижение, м; справа в числителе – статический уровень, м, в знаменателе – минерализация, г/дм<sup>3</sup>; 6 – наблюдательная скважина; 7 – участок с утвержденными в территориальной или государственной комиссии по запасам полезных ископаемых эксплуатационными запасами подземных вод: слева дроби – индекс геологического возраста водоносного подразделения; цифры в числителе – общие запасы суммы категорий (в 10<sup>3</sup> м<sup>3</sup>/сут.), в знаменателе – достигнутый водоотбор на определенную дату и индекс типа воды по ее использованию, П – питьевая; 8 – гидрогеологическая скважина на разрезе: закрашка соответствует химическому составу воды в опробованном интервале глубины; слева – дебит, л/с, и понижение уровня воды, справа – минерализация подземных вод, г/л; 9 – предполагаемая граница водоносного неоген-четвертичного горизонта; 10 – предполагаемый уровень подземных вод; 11 – уровень подземных вод; 12 – валунно-галечные отложения с песчаным заполнителем; 13 – песчаники; 14 – супесь; 15 – пески



**Fig. 4. Hydrogeological section of the Kitoy deposit of drinking groundwater:**

1 – aquifer of modern alluvial deposits (boulders, pebbles, sands); 2 – aquifer of modern Upper Quaternary alluvial deposits (pebbles, sands, gravel); 3 – aquifer of Neogene-Quaternary alluvial deposits; 4 – second Aalenian aquifer complex (sandstones); 5 – hydrogeological well: at the top – the well number; on the left in the numerator – flow rate, l/day, in the denominator – decrease, m; on the right in the numerator – the statistical level, m, in the denominator – mineralization, g/dm<sup>3</sup>; 6 – observation well; 7 – the site with operational reserves of groundwater approved by the Territorial or State Committee on Mineral Reserves: on the left of the fraction – index of the aquifer subdivision geological age; numbers in the numerator – total reserves of the sum of the categories (in 10<sup>3</sup> m<sup>3</sup>/day), in the denominator – achieved water intake for a certain date and the index of the water type according to its use, П – drinking water; 8 – hydrogeological well in the section: the shading corresponds to the chemical composition of water in the sampled depth interval; on the left – flow rate, l/s, and lowering of the water level, on the right – groundwater salinity, g/l; 9 – prospective boundary of the aquiferous Neogene-Quaternary horizon; 10 – estimated groundwater level; 11 – groundwater level; 12 – boulder-pebble deposits with sandy filler; 13 – sandstones; 14 – sandy loam; 15 – sands

Согласно результатам ревизионно-заверочных работ 1993 г., средний коэффициент фильтрации по месторождению равен 122 м/сут., средний коэффициент водопроницаемости – 3400 м<sup>2</sup>/сут. Такие высокие показатели выявлены на территории месторождения, за его пределами они уменьшаются [1]. По качеству воды месторождения удовлетворяют стандартам. На некоторых его участках возможна повышенная минерализация, высокое содержание железа, марганца, может быть использована водоподготовка.

### Заключение

Таким образом, авторы обращают внимание на то, что образование подобных месторождений подземных вод происходит за счет неотектонических волновых колебаний. Проведенный анализ также позволил предположить, что есть и другие участки Бельской зоны современного прогибания, на территории которых могут находиться такие же переуглубленные дислокации с водами достаточного количества и качества, которые могут быть использованы в водоснабжении.

### Список источников

1. Ткаченко И. А. Китойское месторождение подземных вод // Естественные ресурсы подземных вод юга Восточной Сибири / Е. В. Пиннекер, Б. И. Писарский, Б. М. Шенькман [и др.]; отв. ред. И. С. Зекцер. Наука: Новосибирск, 1976. С. 110–113.
2. Месторождения подземных вод Иркутской области. Методика поисков, разведки и оценки запасов: сб. статей / ред. Е. В. Пиннекер, П. И. Трофимчук. Л.: Недра, 1974. 205 с.
3. Воскресенский С. С. Условия формирования и сохранения поверхностей выравнивания на Средне-Сибирском плоскогорье // Ученые записки Московского государственного университета. Геоморфология. 1956. № 182. С. 9–27.
4. Воскресенский С. С., Гроссвальд И. Г. Об отражении новейшей тектоники в геоморфологии Юго-Восточного Присаянья // Ученые записки Московского государственного университета. Геоморфология. 1956. № 182. С. 169–175.
5. Адаменко О. М., Долгушин И. Ю., Ермолов В. В., Исаева Л. Л., Козловская С. Ф., Леонов Б. Н. [и др.]. История развития рельефа Сибири и Дальнего Востока. Плоскогорья и низменности Восточной Сибири / отв. ред. Н. А. Флоренсов. М.: Наука, 1971. 320 с.
6. Проблемы геоморфологии и неотектоники орогенных областей Сибири и Дальнего Востока: материалы Всесоюз. Совещ. по геоморфологии и неотектоники Сибири и Дальнего Востока / ред. Н. А. Флоренсов, Л. К. Зяткова, О. В. Кашменская [и др.]. Т. II. Новосибирск: Наука, 1968. 366 с.
7. Пиннекер Е. В., Писарский Б. И., Ломоносов И. С., Колдышева Р. Я., Диденко А. А., Шерман С. И. Гидрогеология Прибайкалья. М.: Наука, 1968. 170 с.
8. Пиннекер Е. В. Рассолы Ангаро-Ленского артезианского бассейна. М.: Наука, 1966. 332 с.
9. Степанов В. М. Введение в структурную гидрогеологию. М.: Недра, 1989. 229 с.
10. Гидрогеология СССР / вед. ред. В. Г. Ткачук; зам. вед. ред. Е. В. Пиннекер, П. И. Трофимчук. Т. XIX. Иркутская область / ред. А. В. Сидоренко. М.: Недра, 1968. 496 с.
11. Дэвис С., де Уист Р. Гидрогеология. Т. II / пер с англ. М.: Мир, 1970. 254 с.
12. Church M., Ferguson R. I. Morphodynamics: rivers beyond steady state // Water Resources Research. 2015. Vol. 51. Iss. 4. P. 1883–1897. <https://doi.org/10.1002/2014WR016862>.
13. Wright N., Crosato A. The hydrodynamics and morphodynamics of rivers // Treatise on Water Science. 2011. Vol. 2. P. 135–156. <https://doi.org/10.1016/B978-0-444-53199-5.00033-6>.
14. Syvitski J. P. M., Slingerland R. L., Burgess P., Murray A. B., Wiberg P., Tucker G., Voinov A. Morphodynamic models: an overview // River, coastal and estuarine morphodynamics / eds. C. A. Vionnet, M. H. Garcia, E. M. Latruesse, G. M. E. Perillo. London: Taylor & Francis, 2010. P. 3–20.
15. Auge M. Hydrogeology of plains. Cham: Springer, 2016. 73 p.



16. Treatise on geomorphology / ed. J. F. Shroder. San Diego: Academic Press, 2013. 6386 p.

17. Подземный сток на территории Сибири и методы его изучения: сб. статей / отв. ред. Б. М. Шенькман. Новосибирск: Наука, 1979. 135 с.

18. Степанов Ю. Г., Гета Р. И., Синюкевич В. Н. [и др.]. Водные ресурсы и водный баланс бассейна реки Ангары / отв. ред. М. Н. Шимараев. Новосибирск: Наука, 1983. 253 с.

19. Пиннекер Е. В., Писарский Б. И., Шварцев С. Л., Богданов Г. Я., Борисов В. Н., Караванов К. П. Основы гидрогеологии. Общая гидрогеология. Новосибирск: Наука, 1980. 225 с.

20. Возраст и генезис переуглублений на шельфах и история речных долин: сб. стат. / отв. ред. М. Н. Алексеев, Н. И. Николаев, В. Л. Яхимович. М.: Наука, 1984. 217 с.

## References

1. Tkachenko I. A. The Kitoy deposit of groundwater. In: Zektser I. S. (ed.). *Estestvennye resursy podzemnykh vod yuga Vostochnoi Sibiri = Natural resources of underground waters in the south of Eastern Siberia*. Nauka: Novosibirsk; 1976. p.110–113. (In Russ.).

2. Pinneker E. V., Trofimchuk P. I. *Deposits of groundwater in the Irkutsk region. Prospecting, exploration and assessment methods of reserves*. Leningrad: Nedra; 1974. 205 p. (In Russ.).

3. Voskresenskii S. S. Formation and preservation conditions of peneplains on the Central Siberian Plateau. *Uchenye zapiski Moskovskogo gosudarstvennogo universiteta. Geomorfologiya*. 1956;182:9–27. (In Russ.).

4. Voskresenskii S. S., Grossval'd I. G. On latest tectonics reflection in geomorphology of the Southeastern Cis-Sayan region. *Uchenye zapiski Moskovskogo gosudarstvennogo universiteta. Geomorfologiya*. 1956;182:169–175. (In Russ.).

5. Adamenko O. M., Dolgushin I. Yu., Ermolov V. V., Isaeva L. L., Kozlovskaya S. F., Leonov B. N., et al. *Development history of Siberian and the Far East relief. Plateau and lowlands of Eastern Siberia*. Moscow: Nauka; 1971. 320 p. (In Russ.).

6. Florensov N. A., Zyat'kova L. K., Kashmenskaya O. V., et al. *Problems of geomorphology and neotectonics of orogenic regions of Siberia and the Far East: materials of the All-Union Meeting on geomorphology and neotectonics of Siberia and the Far East*. Vol. 2. Novosibirsk: Nauka; 1968. 366 p. (In Russ.).

7. Pinneker E. V., Pisarskii B. I., Lomonosov I. S., Koldysheva R. Ya., Didenko A. A., Sherman S. I. *Hydrogeology of the Baikal region*. Moscow: Nauka; 1968. 170 p. (In Russ.).

8. Pinneker E. V. *Brines of the Angara-Lena artesian basin*. Moscow: Nauka; 1966. 332 p. (In Russ.).

9. Stepanov V. M. *Introduction to structural hydrogeology*. Moscow: Nedra; 1989. 229 p. (In Russ.).

10. Tkachuk V. G., Pinneker E. V., Trofimuk P. I. *Hydrogeology of the SSSR*. Vol. 19. *The Irkutsk region*. Moscow: Nedra; 1968. 496 p. (In Russ.).

11. Davis S. N., R. J. M. *Hydrogeology*. Vol. 2. 1966. 254 p. (Russ. ed.: *Gidrogeologiya*. Moscow: Mir, 1970. 254 p.).

12. Church M., Ferguson R. I. Morphodynamics: rivers beyond steady state. *Water Resources Research*. 2015;51(4):1883-1897.

<https://doi.org/10.1002/2014WR016862>.

13. Wright N., Crosato A. The hydrodynamics and morphodynamics of rivers. *Treatise on Water Science*. 2011;2:135-156. <https://doi.org/10.1016/B978-0-444-53199-5.00033-6>.

14. Syvitski J. P. M., Slingerland R. L., Burgess P., Murray A.B., Wiberg P., Tucker G., Voinov A. Morphodynamic models: an overview. In: Vionnet C. A., Garcia M. H., Latrubesse E. M., Perillo G. M. E. (eds.). *River, coastal and estuarine morphodynamics*. London: Taylor & Francis; 2010. p.3–20.

15. Auge M. *Hydrogeology of plains*. Cham: Springer; 2016. 73 p.

16. Shroder J. F. *Treatise on geomorphology*. San Diego: Academic Press; 2013. 6386 p.

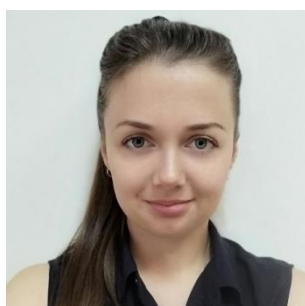
17. Shen'kman B. M. *Groundwater runoff in Siberia and its study methods*. Novosibirsk: Nauka; 1979. 135 p. (In Russ.).

18. Stepanov Yu. G., Geta R. I., Sinyukevich V. N., et al. *Water resources and water balance of the Angara river basin*. Novosibirsk: Nauka; 1983. 253 p. (In Russ.).

19. Pinneker E. V., Pisarskii B. I., Shvartsev S. L., Bogdanov G. Ya., Borisov V. N., Karavanov K. P. *Fundamentals of hydrogeology. General hydrogeology*. Novosibirsk: Nauka; 1980. 225 p. (In Russ.).

20. Alekseev M. N., Nikolaev N. I., Yakhimovich V. L. *Age and genesis of overdeeping on the shelves and the history of river valleys*. Moscow: Nauka; 1984. 217 p. (In Russ.).

## Информация об авторах / Information about the authors



**Кураничева Анна Игоревна**,  
гидрогеолог второй категории,  
АО «Урангеологоразведка» АО «Росгеология», Ангарская экспедиция,  
г. Иркутск, Россия,  
аспирант,  
Институт земной коры СО РАН,  
г. Иркутск, Россия,  
[kuranicheva.ai@mail.ru](mailto:kuranicheva.ai@mail.ru).



**Anna I. Kuranicheva,**  
Second Category Hydrogeologist,  
JSC Urangeo of JSC Rosgeo, Angarsk Expedition,  
Irkutsk, Russia,  
Postgraduate Student,  
Institute of the Earth's Crust, Siberian Branch of the Russian Academy of Sciences,  
Irkutsk, Russia,  
kuranicheva.ai@mail.ru.



**Ланкин Юрий Константинович,**  
руководитель,  
Иркутский территориальный центр  
государственного мониторинга геологической среды,  
АО «Урангеологоразведка» АО «Росгеология», Ангарская экспедиция,  
г. Иркутск, Россия,  
yur-lankin@yandexl.ru.  
**Yuri K. Lankin,**  
Head of Irkutsk Territorial Center of State Monitoring of Geological Environment,  
JSC Urangeo of JSC Rosgeo, Angarsk Expedition,  
Irkutsk, Russia,  
yur-lankin@yandexl.ru.



**Наумова Ольга Олеговна,**  
главный гидрогеолог,  
Иркутский территориальный центр  
государственного мониторинга геологической среды,  
АО «Урангеологоразведка» АО «Росгеология», Ангарская экспедиция,  
г. Иркутск, Россия,  
jalo\_1985@mail.ru.  
**Olga O. Naumova,**  
Chief Hydrogeologist,  
Irkutsk Territorial Center of State Monitoring of Geological Environment,  
JSC Urangeo of JSC Rosgeo, Angarsk Expedition,  
Irkutsk, Russia,  
jalo\_1985@mail.ru.

#### **Вклад авторов / Contribution of the authors**

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

#### **Конфликт интересов / Conflict of interests**

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

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

#### **Информация о статье / Information about the article**

Статья поступила в редакцию 04.06.2021; одобрена после рецензирования 02.07.2021; принята к публикации 05.08.2021.

The article was submitted 04.06.2021; approved after reviewing 02.07.2021; accepted for publication 05.08.2021.





## EXPLORATION AND DEVELOPMENT OF MINERAL DEPOSITS

Original article

<https://doi.org/10.21285/2686-9993-2021-44-3-261-270>



# Technological solutions for drilling a trap intrusion section on the Srednebotuobinskoe oil gas condensate field, East Siberia

Yevgeniy V. Tuzov<sup>a</sup>, Tatiana Yu. Kutuzova<sup>b</sup>,

<sup>a,b</sup>LLC Taas-Yuryakh Neftegazodobycha, Irkutsk, Russia

Corresponding author: Yevgeniy V. Tuzov, TuzovEV2@tyngd.rosneft.ru

**Abstract.** One of the largest trap intrusion provinces, Siberian traps, is located in the East-Siberian Platform in Russia. A trap intrusion zone usually has abnormally low reservoir pressures and natural fractures. Consequently, trap drilling is associated with fluid losses that can be catastrophic. The section of trap intrusion is a part of a Ø 174 mm production casing section of the Srednebotuobinskoe field. The basic well design of this section also includes the Osinsky horizon, which features an abnormally high reservoir pressure zone. The latter creates incompatible with drilling conditions environment due to the presence of catastrophic loss zones in traps. Time spent on drilling a trap intrusion zone accounts for up to 30 % of the total well drilling time. The abovementioned geological issues in directional wells become the key topic in solving it. The method to resolve this issue is an integrated approach employing all the technologies and technical facilities aimed at finding a technological solution. First of all, in order to optimize the well construction cycles and reduce the complications, all the wells were classified in three categories as per the type of behavior in trap intrusion. This allowed to work out multi-level activities, that depended on severity of losses and non-operational time spent on drilling through this section. An alternative well design was developed and trialed on several wells, which showed positive results on decreasing non-productive timing. The main concept of this design was significantly different from the basic well design that was used in the past on the Srednebotuobinskoe field. The main difference was isolation of traps from the high pressure Osinsky horizon lower section with a Ø 245 mm casing string, which allowed safe splitting of two incompatible drilling zones. The economic effect of this solution allowed saving of up to 10.4 days or 15 % of the construction time in the wells of first category. These results were reviewed at the Technical Committee of the Company and agreed to implement the alternative well design on first category wells on the Srednebotuobinskoe field. In addition, for the rest of well categories the Drilling Team has produced and successfully implemented the preventative measures that allowed drilling through traps with lost circulation material. It is worth to mention that this method assumed a by-passing mud-cleaning system on the rig to allow building up a solid phase thus stemming the losses while drilling. For all the categories of the wells the Drilling team has selected and trialed different types and designs of drilling bits that would allow drilling hard rock such as dolerite section in traps with minimal number of runs. For the last five years the Drilling team together with the bit producing companies have designed a new type of PDC cutters that would allow to enhance durability as well as improve drilling speed both in dolerite formations and in overlying formations in the Production casing section. The Drilling team has also managed to reduce the number of trips associated with early bit wear decreasing them from five to two runs and create an experimental basis for drilling the entire section of the production casing in one run. From 2019 team continue looking for further solutions that would allow to improve bottomhole assembly elements balancing between durability and drilling rate in different types of formations above and below traps. A range of proposed technological solutions significantly reduced the impact on the well construction performance by preventing and reducing the downhole losses events in the section of trap intrusion on the Srednebotuobinskoe field.

**Keywords:** well design, lost circulation material pill, cementing, trap intrusion, dolerite, drilling, drilling bit

**For citation:** Tuzov Y. V., Kutuzova T. Yu. Technological solutions for drilling a trap intrusion section on the Srednebotuobinskoe oil gas condensate field, East Siberia. *Nauki o Zemle i nedropol'zovanie = Earth sciences and subsoil use*. 2021;44(3):261-270. <https://doi.org/10.21285/2686-9993-2021-44-3-261-270>.



## РАЗВЕДКА И РАЗРАБОТКА МЕСТОРОЖДЕНИЙ ПОЛЕЗНЫХ ИСКОПАЕМЫХ

Научная статья  
УДК 622.248.3**Технологические решения в бурении трапповой интрузии  
на Среднеботуобинском нефтегазоконденсатном  
месторождении (Восточная Сибирь)****Евгений Виссарионович Тузов<sup>а</sup>, Татьяна Юрьевна Кутузова<sup>б</sup>**<sup>а,б</sup>ООО «Таас-Юрх Нефтегазодобыча», г. Иркутск, Россия

Автор, ответственный за переписку: Тузов Евгений Виссарионович, TuzovEV2@tyngd.rosneft.ru

**Резюме.** Одна из самых крупных трапповых провинций Сибирские траппы расположена на Восточно-Сибирской платформе. Зона распространения трапповых интрузий, как правило, имеет аномально низкие пластовые давления и естественную трещиноватость, вследствие чего проходка интрузивов сопровождается поглощениями промывочной жидкости вплоть до катастрофических. Участок трапповой интрузии на скважинах Среднеботуобинского месторождения находится в секции эксплуатационной обсадной колонны Ø 174 мм. Базовая конструкция скважин данной секции также включает в себя осинский горизонт, в котором присутствует зона с аномально высоким пластовым давлением, создающая условия, не совместимые с бурением из-за присутствия зон катастрофических поглощений в участке трапповой интрузии. Временные затраты по проходке зон интрузии составляют до 30 % от общего баланса циклов строительства скважин. Вышеизложенная проблематика геологических осложнений в наклонно-направленных скважинах является приоритетной задачей, и методика борьбы с ними представляет собой комплексный подход всех технологий и технических средств, которые обращены к одной цели. Так, для оптимизации циклов строительства скважин и снижения количества осложнений была проведена классификация трапповой интрузии по трем категориям, которая позволила разработать многоуровневый ряд мероприятий по проведению работ в трапповых интрузиях в зависимости от характера поглощений и аварийного времени, потраченного на проходку данного участка. Была разработана альтернативная конструкция скважин, а также проведены опытно-промышленные испытания по ее применению, которые показали положительный результат по снижению аварийного времени. Основная концепция данной конструкции значительно отличается от принятой базовой конструкции скважин на Среднеботуобинском месторождении. Одной из отличительных особенностей явилось то, что участок трапповой интрузии разделялся от нижнего участка аномально высокого пластового давления осинского горизонта обсадной колонной Ø 245 мм, что позволило разобщить несовместимые зоны бурения. Экономический эффект от применения данной конструкции на скважинах первой категории составил до 10,4 суток или 15 % от всего цикла строительства скважины. На научно-техническом совещании был рассмотрен и оценен эффект от применения альтернативной конструкции на некоторых из кустовых площадок, а также принято решение о тиражировании ее на Среднеботуобинском месторождении. Для остальных категорий скважин был разработан и успешно внедрен комплекс мероприятий по превентивной кольматации поглощающих интервалов в зоне интервала прохождения трапповых интрузий. Следует заметить, что в данный комплекс вошла методика с бурением с наработкой твердой фазы из-за циркуляции в обход системы очистки бурового раствора, что позволило более эффективно проводить кольматацию участка катастрофических поглощений. Для всех категорий скважин были апробированы различные дизайны долот, которые позволили бы проходить участок твердых долеритов трапповой интрузии с минимальным количеством спусков. За последние пять лет бурения технологической командой совместно с производителями долот был подобран и разработан новый тип резцов долот PDC, благодаря чему не только улучшилась износостойкость, но и значительно повысилась скорость бурения как в долеритах трапповой интрузии, так и в вышележащих пластах в секции под эксплуатационную обсадную колонну. Удалось снизить количество спуско-подъемных операций, связанных с ранним износом долота, с пяти до двух и создать экспериментальную основу для поиска возможности бурения всей секции эксплуатационной обсадной колонны в один спуск. С 2019 года ведется подбор элементов рабочей компоновки, который позволил бы сбалансировать и сочетать в себе элементы износостойкости и скорости проходки при бурении различных горных пород, присутствующих в данной секции. В результате введения данного комплекса мероприятий удалось минимизировать возникновение поглощений при прохождении трапповой интрузии на всех кустовых площадках и существенно сократить сроки строительства скважин на Среднеботуобинском месторождении.

**Ключевые слова:** конструкция скважин, кольматационная пачка, цементирование, трапповая интрузия, долериты, бурение, породоразрушающий инструмент

**Для цитирования:** Тузов Е. В., Кутузова Т. Ю. Технологические решения в бурении трапповой интрузии на Среднеботуобинском нефтегазоконденсатном месторождении (Восточная Сибирь) // Науки о Земле и недропользование. 2021. Т. 44. № 3. С. 261–270. <https://doi.org/10.21285/2686-9993-2021-44-3-261-270>.



## Introduction

Trap magmatism is a distinct type of continental magmatism, which is characterized by huge volumes of basalt eruption during a geologically short period (first few million years) over large territories [1]. Several studies are devoted to the geological structure of trap intrusions of the Siberian Platform by M. M. Odintsov, I. I. Krasnova, V. S. Obruchev, V. S. Masaitis, et al. These studies offer several hypotheses regarding trap intrusion characteristics, such as:

- Eruption of traps potentially occurring in uplift conditions with predominantly a central eruption type;
- Ingress of dolerite sills through the monoclinical dip from Kansk-Taseevo depression, which is a localized trap magmatism zone;
- Crystalline basement fault zone;
- Deep magma-conductive faults, which define maximum trap thickness zones, yet do not delineate separate magmatic bodies or elements of their morphology [2].

In East Siberia, within the boundaries of the Srednebotuobinskoe Oil Gas Condensate Field, traps are represented as intrusions in sedimentary deposits. The field is located along the edge of a trap body and has mostly evenly distributed interval thickness yet differing interval depths (Fig. 1). In the Srednebotuobinskoe Oil Gas Condensate Field, trap intrusion thickness varies

significantly from one well pad to another ranging between 140 and 450 m along the borehole [3, 4].

Trap intrusion intervals are composed of hard rock, dolerite, which is found in various rock formations. Given the physical-mechanical strength of a trap intrusion:  $\rho = 2930 \text{ kg/m}^3$ , hardness category 100–150, 600–700, abrasiveness category 1–3, medium-to-hard, drilling in the interval has some complicating factors [5, 6]:

- Total losses (Fig. 2);
- A reduced rate of penetration to 0 m/h;
- Critical wear of drilling bits;
- Extra trip to replace polycrystalline diamond compact (PDC) bits with tri-cone bits;
- More extended well construction period as trap intrusions are drilled by tri-cone bits;
- Destroyed and left in hole bit's parts.

A combination of the above factors resulted in significant time lost in drilling such intervals [7, 8]. To optimize drilling in trap intrusion intervals, three categories of traps behavior were identified:

- Wells where losses occurred immediately after penetrating the top of traps, were referred to as Category 1 of trap behavior (10–20 % of the well stock)<sup>1</sup>;
- Wells drilled with lost circulation material pill (LCM) without any losses were referred to as Category 2 of trap behavior. Once the hole was cleaned of LCM, however, losses occurred again (70–80 % of well stock);

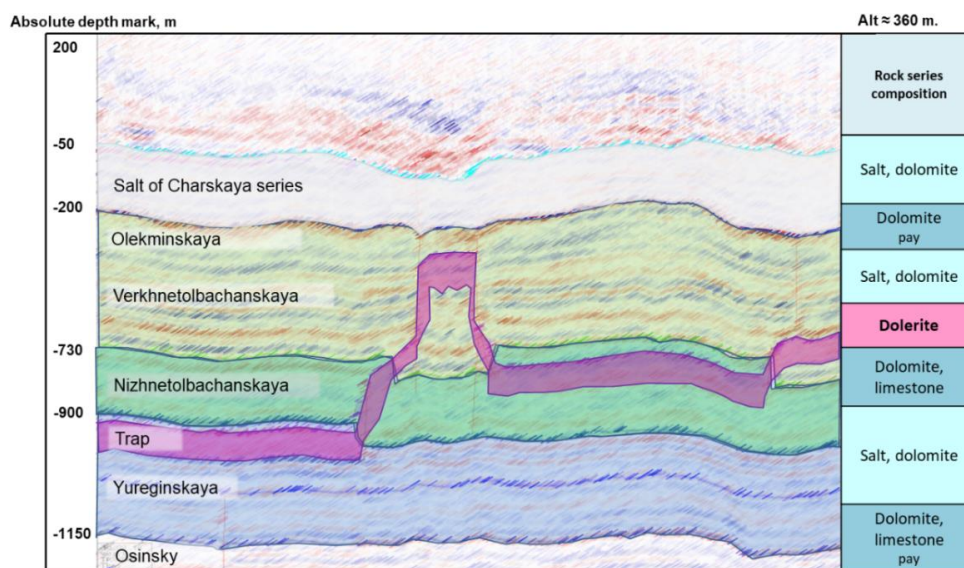
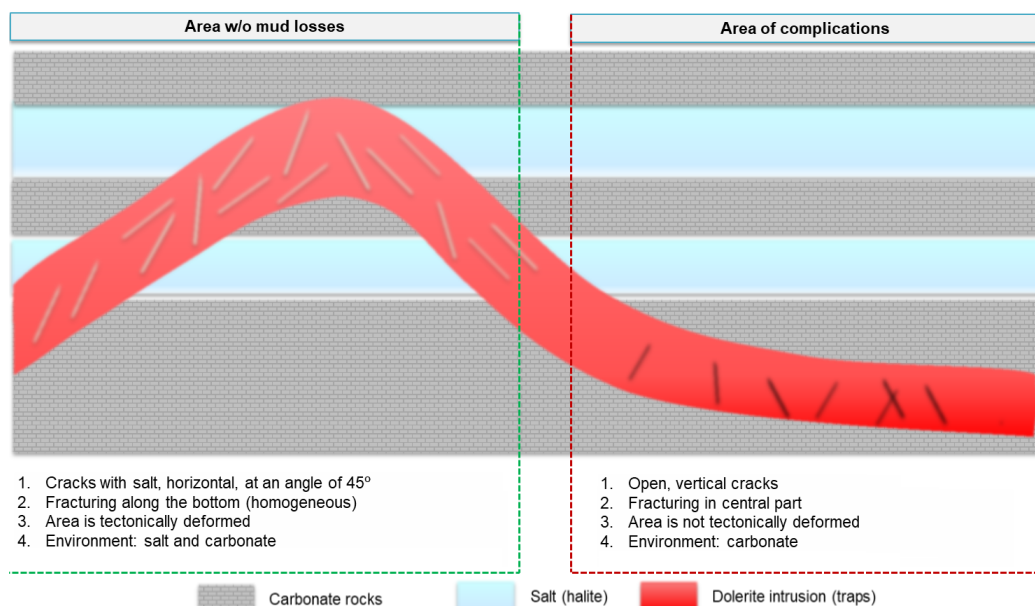


Fig. 1. Geological structure of a trap intrusion: typical cross-section

Рис. 1. Усредненный разрез геологического строения трапповой интрузии

<sup>1</sup> Басарыгин Ю. М., Булатов А. И., Проселков Ю. М. Осложнения и аварии при бурении нефтяных и газовых скважин: учеб. для студентов вузов. М.: Недра, 2000. 678 с.



**Figure 2. Losses in trap intrusion: a geological concept**

**Рис. 2. Геологическая концепция поглощения в трапповой интрузии**

– Wells drilled without any problems were referred to as Category 3 of trap behavior (10–20 % of the well stock).

The above-described geological challenges constitute a priority issue to be addressed, and the methodology for resolving the problem requires an integrated approach with a range of technologies and operational ways to achieve a single goal. This goal, is to optimize the well construction cycle and to reduce the number of complications, in order to achieve this, a multi-tier action plan was developed to improve drilling operations in trap intrusions.

### Materials and methods of research

**Alternative Well Design.** The underlying objective for improving drilling technologies is to reduce the well economics and cost per meter drilled in certain intervals while maintaining the overall quality of the drilling operations. The current well design was optimized by adjusting the 245 mm casing shoe depth to provide additional isolation mechanical for the trap interval [9, 10].

Alternative well design, therefore, entails significant potential for resolving geological issues that are not technology-induced. The critical areas for further studies include:

– Selection of an optimal cementing solution for an extended 245 mm casing, without using a

stage cementing collar and applying light cement slurry and LCM [11];

– Selection of 293/219 mm bit design allowing drilling with higher Rate of penetration (ROP) in the surface casing and production casing intervals, as well as the selection of bottomhole assembly (BHA) components with an alternative logging while drilling signal channel that will allow pumping viscous LCM pills.

Based on the situation in 2020, a decision was made to conduct a set of pilot tests: drill five wells according to the alternative 3-casing design [12, 13]. Figure 3 shows a comparison of the two well techniques. The alternative design isolates two of three incompatible drilling zones (both traps and Olekminsky formation) from the Osinsky Horizon [14].

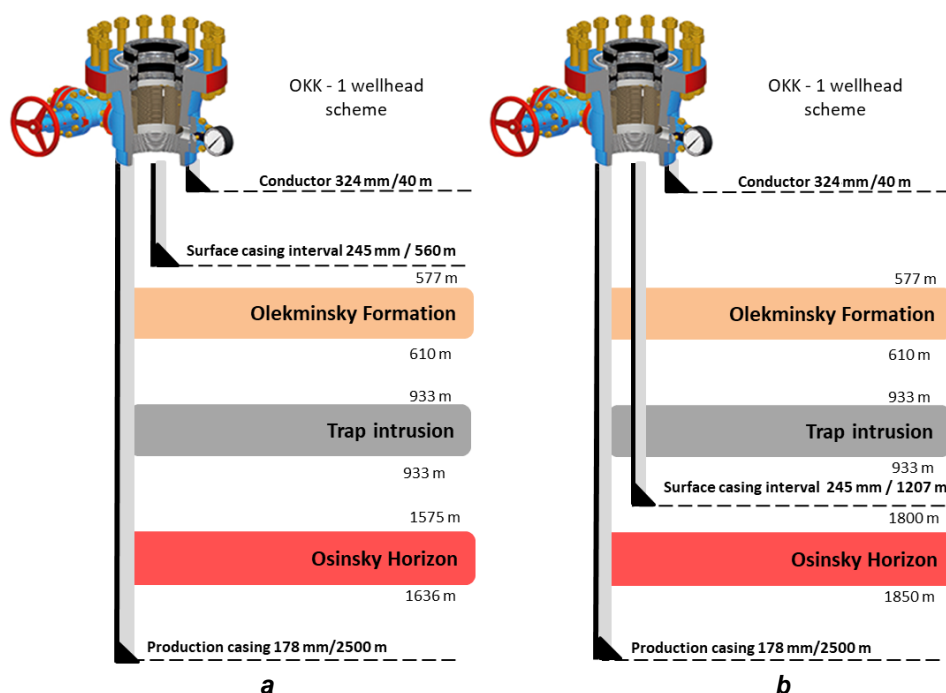
The Osinsky Horizon contains hydrocarbons and requires a blowout preventer as an additional barrier before penetrating it. To ensure the reliability of cementing 245 mm casing, two-stage cementing is planned using a stage cementing collar<sup>2</sup>. The main advantages of this solution include:

– Separation of two incompatible drilling intervals: trap intrusions and Osinsky [15, 16];

– Reduction of the non-productive time due to losses in trap intrusion interval (up to seven days on specific well pads);

<sup>2</sup> Семенов Н. Я. Разработка методов выбора и управления технологическим процессом изоляции поглощающих пластов: дисс. ... канд. техн. наук: 05.15.10. М., 1984. 290 с.





**Fig. 3. Comparison of two well designs:**

*a – current three-string design; b – alternative three-string design*

**Рис. 3. Сравнение двух конструкций скважин:**

*a – текущая трехколонная конструкция; b – альтернативная трехколонная конструкция*

– Reduction of well costs through lower consumption of cement and drilling mud;

– Reduced cementing length of 178 mm casing and avoidance of inter-casing pressures [17].

Key disadvantage: increased cost due to a longer 245 mm casing and use of a stage cementing collar.

Based on the results of drilling two alternative design wells on a pilot well pad in 2021, in comparison with three wells drilled in 2020, the following dynamics (Fig. 4) can be observed:

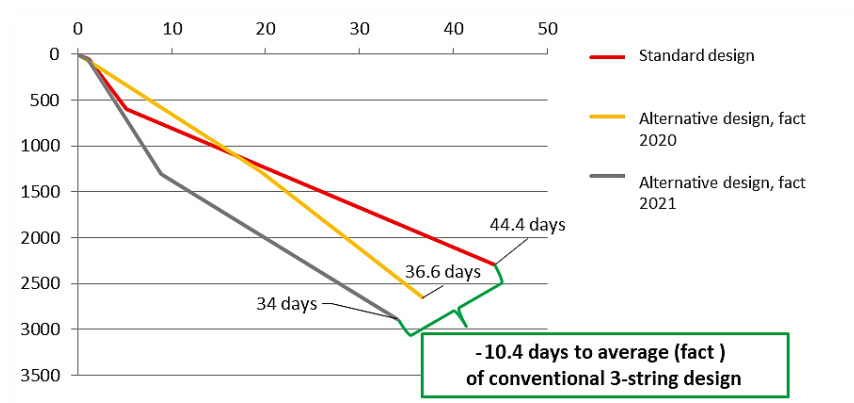
– Surface casing interval drilling time reduced by eight days;

– Production casing interval drilling time was

reduced by 2.6 days, while the depth of the production casing interval increased by 230 m.

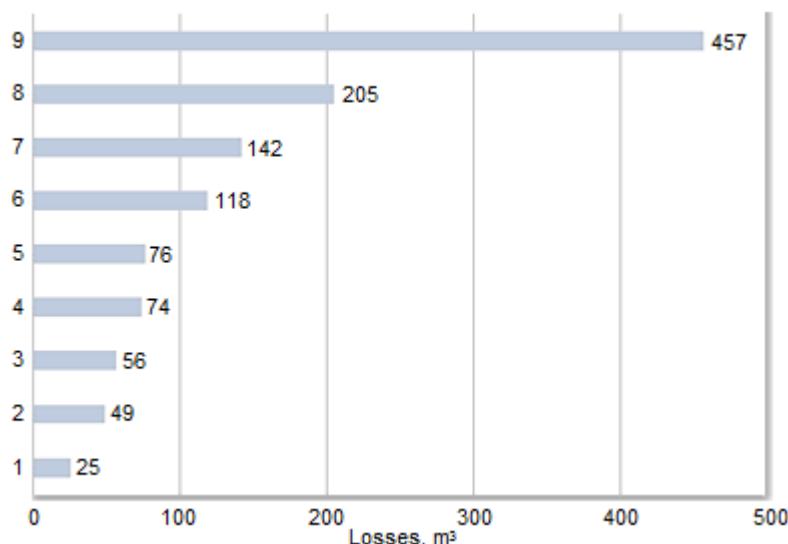
A comparison of the drilling results of five wells with the current design and alternative design indicates a reduction in drilling time by 8.6 days per well; due to a reduced time spent on loss elimination in trap intrusion intervals.

*Development of Losses Fighting Concept.* Losses encountered while drilling in trap intrusion intervals are often catastrophic (Fig. 5), i. e. a total loss of mud circulation is observed. Given the physical-mechanical strength of trap intrusions (circa 52,000 psi), the interval is drilled at a low penetration rate (0.3 to 3 m/h).



**Fig. 4. Reduction dynamics of well construction time at a pilot multi-well pad**

**Рис. 4. Динамика снижения сроков строительства скважин на экспериментальной кустовой площадке**



**Fig. 5. Average mud loss per well on drilling pads in 2021 (6 months), m<sup>3</sup>**

**Рис. 5. Средний объем поглощения, приходящийся на одну скважину по кустовым площадкам в 2021 г. (6 месяцев), м<sup>3</sup>**

A review of current drilling data revealed a connection between loss occurrence and the position of traps within the cross-section. Deeper trap intervals result in higher losses. Losses are also pad-specific and depend on pad location within the field. The probability of intensive losses is high on well pads located in the North of the Srednebotuobinskoe Field. Attempts at analyzing and determining loss dependence on azimuth or deviation did not yield any results. High deviation angle in drilling resulted in a longer trap interval in the well, which created a more significant complication with more losses and more cement plugs installed. It should be noted that cement quite frequently provided only temporary isolation, and losses recurred later. This can be explained by the fact that subsequent drilling under the trap interval exposed cement to significant vibration resulting from the rotating drill string, which consequently caused the glue to fall off from cracks [18].

The first step was developing preventive Measures for Drilling Trap Intrusions. To develop a concept for fighting losses in trap intrusion intervals, a complex strategy was developed and tested: preventive LCM for mitigation of risks of mud losses [19]. The strategy includes preliminary treatment of drilling mud 50 m before penetrating into trap intrusion top and in the process of drilling in the trap intrusion in line with the following scheme:

- Remove screens from shale shaker and treat active mud system with BAROFIBRE

COARSE: 8 kg/m<sup>3</sup>, CF-1: 20 kg/m<sup>3</sup>, BARACARB 150: 50 kg/m<sup>3</sup>, BARACARB 600: 50 kg/m<sup>3</sup>;

- Prepare LCM pill (10 m<sup>3</sup>) as follows: BAROFIBRE COARSE: 20 kg/m<sup>3</sup>, CF-1: 30 kg/m<sup>3</sup>, NUT SHELL MEDIUM: 50 kg/m<sup>3</sup>, STOP-PIT: 15 kg/m<sup>3</sup>;

- Ensure rheological parameters of mud, which prevent LCM particles from dropping out and forming seal plugs;

- For the period of drilling with LCM-containing mud, avoid using screens ≤ 5 mm in the circulation system of the BHA.

- Once the bottom of trap intrusion is reached, install shale shakers screens to take LCM out and clean drilling mud for further drilling.

The preventive LCM strategy showed a positive result in category three wells with trap intrusions. When attempting to drill trap sections, which refer to category 2, using preventive activities, there was no success as mud losses occurred straight after washing out LCM.

The second step was developing preventative Measures in case of total losses in Trap Intrusion Intervals. In the event of a complete loss of circulation, it is required to stop circulation and align the circulation system to the mud pit (to drill with a “floating water column”) for utilizing the liquid phase. “Floating water column” principle envisages drilling with technical water taken from the mud pit simultaneously adding brine (CL-180000 mg/l) into the annulus from the fill-up tank at a rate of 1 m<sup>3</sup> every 30 minutes.



If the circulation is partially restored, circulate the well via the deep clean circulation system tank and add the remaining brine into circulation to maintain its concentration at CL-180000 mg/l.

If the tripping is required, the well should be filled up with salt-saturated mud (double the well volume).

These measures yield a positive effect in saving in water consumption (given the unavailability of technical water), in chemical consumption, and in time required for mud conditioning.

The third step was conducting the Pilot Tests with Litefill and with two-phase solutions. During pilot tests, various litefill and two-phase solution (HALKER) were trialed. Based on the results of the tests, we noted that the effect of decreasing the number of cement plugs per well, but due to the time required for mixing and the risk of premature setting in a drill string, a decision was made not to use these chemicals. Attempts to select the isolating material guarantee 100 % isolation did not bring any sound results.

*Development of Drilling Bits approaches to drill in Trap Intrusions.* Starting from commercial production drilling in the Srednebotuobinskoe Oil Gas Condensate Field, drilling in trap intrusions was performed according to the following approach: drilling above the trap intrusion, drilling in the trap intrusion, and drilling below the trap intrusion.

Trap bodies were drilled with tri-cone bits as PDS bits with classic cylinder bit inserts but did not allow us to achieve desired ROP results, and there was also fatal fatigue after drilling 10–15 meters into the trap body [20]. The drilling technology is based on the following: once a trap intrusion interval was penetrated, the BHA was pulled out to change bit type from PDC to tri-cone. Tri-cone bits (code LADS 637) were used to drill through the trap intrusions. Due to high trap body strength, the ROP was in the range of 0.7–3.2 m/h. On average, drilling in a trap body (thickness: 150–200 m) was taking from 3 to 12 days.

As a result of the continuous use of tri-cone bits, problems with bit parts breaking off and falling to the bottomhole occurred quite often. The problem was significant when additional time was required to retrieve lost details from the well (1.5 to 3 days on average). To solve the problem and

to optimize the drilling process in trap intrusions, a range of suitable PDC bits were developed (series FT716 and SKH1616D-A1D) and (MDS1616 and MDS1617).

As a result of the adaptation of new bit designs, improvements were made in the efficiency of drilling intervals before traps and in traps using PDC bits. Were achieved the following indicators: an average gap of trap intrusion drilled by PDC bits is from 30 to 70 m, ROP is from 3 to 4 m/h.

In addition, new bit designs were developed with the following results: Tektonic 219.1mm series: in trap intrusions with a thickness of up to 140 m, ROP was 4 m/h; StingBlade series: in trap intrusions with a thickness of up to 130m, ROP was 4.5 m/h, and in 152 m thickness, ROP was 4.5 m/h. Due to high-quality drilling performance, the bits were used for drilling in trap intrusions. A chart was developed with a complete description of the required parameters for more effective drilling.

Thanks to the high resistance of Stinger inserts to mechanic impact and wear, StingBlade bits ensure 100 % trap intrusion drilling in one trip. New records were set in drilling trap intrusion thickness of up to 400 m in one trip:

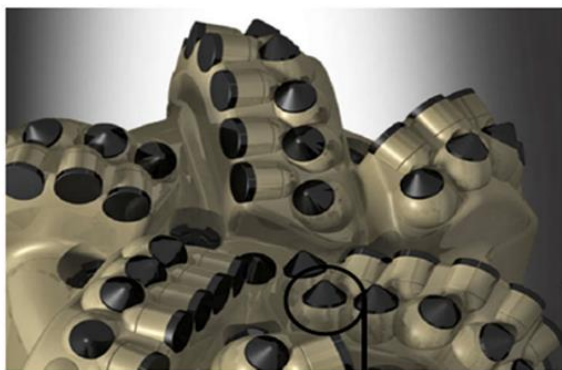
- Average ROP in the interval before the trap intrusion is 16.4 m/h;
- Average ROP in the trap intrusion interval is 5.08 m/h;
- Average ROP in the interval before trap intrusion and trap intrusion is 9.52 m/h.

A specific feature of the bits is cone-shaped diamond inserts (Stinger), an innovative, upgraded solution for blades that is significantly more effective than any other PDC bit. The insert, located in the center, ensures even load on a bit and more effective rock destruction, which increases bit life and penetration rates. Bits of this series have demonstrated that they can drill the trap intrusion intervals in a single trip (Fig. 6).

### Research results and discussion

Implementation of the above measures allowed us to minimize mud losses when drilling in trap intrusions on all well pads and to reduce well construction period and costs.

1. The “alternative design” application on five pilot wells indicated that the average time required for well construction is 8.6 days less than



#### Stringer insert

- Cone shape
- Thicker diamond layer
- Higher wear properties and shock strength



**Fig. 6. Design of a StingBlade series bit**  
**Рис. 6. Дизайн долота серии StingBlade**

the time needed for the construction of conventional design wells on the same well pad. The design yields a positive effect only for Category 1 wells (10–20 % of the stock).

2. Time spent drilling above and in traps is 108.8 hrs (4.5 days), allowing to drill them in a single stage rather than two in the past.

3. The application of StingBlade bits reduced drilling time to 64.6 hrs (2.7 days). Non-productive time (NPT): -1.8 days and saving time for tripping to replace the bit.

4. The application of LCM pills shows a positive economic effect in Category 2 and Category 3 wells (in time reduction by up to 2 days and in the cost of drilling mud chemicals).

5. The search for reliable mud motor systems which allow the usage of high concentration LCM and drill solids would allow to drill all three sections of Production casing interval in a single stage and achieve further improvement in drilling time and economics.

### Summary

The pursuit of technological solutions to the current problem in trap intrusion allowed Drilling Engineering Team to look at the problem from different prospective. Namely, alternative casing design implementation revealed several weak points in the old casing design and their potential to lead to issues like Well Control, etc. The trial of Alternative casing design allowed to expand of this solution to other neighbor fields once economic upside was weighed against the cost of the casing design. The introduction and implementation of preventative measures like drilling with LCM solids allowed us also revisit traditional drilling in fractured formations.

### References

1. Abrosimova O. O., Kulagin S. I. Structural features of Cambrian sediments within Mirninskiy ridge (Nepa-Botuoba anticline). *Izvestiya Tomskogo politekhnicheskogo universiteta*. 2010;316(1):48-52. (In Russ.).
2. Tuzov E. V. Problems of wells drilling in the interval of trap intrusion at the Srednebotuobinskoye field. *Stroitel'stvo neftyanykh i gazovykh skvazhin na sushe i na more*. 2021;2:18-24. (In Russ.). [https://doi.org/10.33285/0130-3872-2021-2\(338\)-18-24](https://doi.org/10.33285/0130-3872-2021-2(338)-18-24).
3. Akat'ev V. A., Bliznyukov V. Yu. Analysis of mining and geological conditions and designs of deep and ultra-deep wells. *Stroitel'stvo neftyanykh i gazovykh skvazhin na sushe i na more*. 1997;3-4:9-14. (In Russ.).
4. Sobolev V. S. *Petrology of traps*. Novosibirsk: Nauka; 1986. 209 p. (In Russ.).
5. Fokin V. V., Polyakov V. N., Sonin V. N., Kuznetsov R. Yu. Field experience of losts circulation control in difficult drilling conditions of the East Siberia. *Neftegazovoe delo = Oil and Gas Business*. 2009;9. Available from: [http://ogbus.ru/files/ogbus/authors/Fokin/Fokin\\_1.pdf](http://ogbus.ru/files/ogbus/authors/Fokin/Fokin_1.pdf). [Accessed 13<sup>th</sup> May 2021]. (In Russ.).
6. Shishin K. A. Main issues of drilling wells in Eastern Siberia. In: Kazanskii V. V. (ed.). *Sovershenstvovanie tekhnologii bureniya neftyanykh i gazovykh skvazhin v Vostochnoi Sibiri i Yakutii = Improving drilling technology of oil and gas wells in Eastern Siberia and Yakutia*. Novosibirsk: Siberian Research Institute of Geology, Geophysics and Mineral Resources; 1981. p.3–10. (In Russ.).
7. Akulov N. I., Valeev R. R. Peculiarities of the Srednebotuobinsk oil-and-gas deposit geological structure. *Izvestiya Irkutskogo gosudarstvennogo universiteta. Seriya "Nauki o Zemle" = Bulletin of Irkutsk State University. Series "Earth Sciences"*. 2016;18:3-13. (In Russ.).
8. Belyakov A. Yu., Chernokalov I. A., Makarov A. P., Gorbov A. N. Mud loss elimination in highly trappean doleritic intrusives of Srednebotuobinskoe field. *Burenie i nef't*. 2016;2:44-47. (In Russ.).
9. Bliznyukov V. Yu., Povalikhin A. S. Geological section classification based on its interval drilling conditions when designing a rational structure of prospecting and exploration wells in a complex exploration field. *Inzhener-nef'tyanik*. 2016;4:17-25. (In Russ.).





10. Bliznyukov V. Yu., Myslyuk M. A. Selection of a rational well design with undefined initial data. *Neftyanoe khozyaistvo*. 1994;10:15-17. (In Russ.).
11. Bulatov A. I., Izmailov L. B., Lebedev O. A. *Well designing*. Moscow: Nedra; 1979. 280 p. (In Russ.).
12. Takhautdinov Sh. F., Khisamov R. S., Abdrakhmanov G. S., Akhmadishin F. F., Pronin V. E., Ismagilov R. M. Advances in well design. *Neftyanoe khozyaistvo*. 2016;7:40-43. (In Russ.).
13. Bliznyukov V. Yu., Bliznyukov Yu. N., Bliznyukov Vit. Yu., Duzhik S. A. *Improving deep well designs*. Moscow: All-Russian Research Institute of Organization, Management and Economy of the Oil and Gas Industry; 1991. 84 p. (In Russ.).
14. Mouchet J. P., Mitchell A. *Abnormal pressures while drilling. Origins – prediction – detection – evaluation*. Paris: Editions Technip; 1989. 255 p.
15. Ashraf'yan M. O. *Technology of separation of layers in complicated conditions*. Moscow: Nedra; 1989. 227 p. (In Russ.).
16. Krylov V. I. *Isolation of lost circulation zones in deep wells*. Moscow: Nedra; 1980. 304 p. (In Russ.).
17. Gaivoronskii A. A., Tsybin A. A. *Well cementing and zonal isolation*. Moscow: Nedra; 1981. 367 p. (In Russ.).
18. Miloserdov E. E., Ganiev D. F., Gerlinskii P. V., Lemeshov S. A., D'yachenko M. S., Izmailov A. P., et al. Causes of accidents and complications when drilling production wells in the fields of Eastern Siberia. *Opyt, aktual'nye problemy i perspektivy razvitiya neftegazovogo kompleksa: materialy Mezhdunarodnoi nauchno-prakticheskoi konferentsii obuchayushchikhsya, aspirantov i uchenykh = Experience, actual problems and development prospects of oil and gas complex: materials of the International scientific and practical conference of students, graduate students and scientists*. In 2 vol. Vol. 1. Tyumen: Industrial University of Tyumen; 2017. p.156–160. (In Russ.).
19. Polyakov V. N., Mavlyutov M. R., Alekseev L. A., Kolodkin V. A. *Technique and technology to fight mud losses under well construction*. Ufa: Kitap; 1998. 187 p. (In Russ.).
20. Polyakov V. N. Methods of evaluation and improving well integrity and wellbore stability while drilling and completing complex wells. *Preduprezhdenie i likvidatsiya oslozhnenii pri burenii glubokikh skvazhin: tezisy докладов kraevoi nauchno-prakticheskoi konferentsii = Prevention and elimination of complications while drilling deep wells: report abstracts of a regional scientific and practical conference*. Krasnoyarsk; 1981. p.39–41. (In Russ.).

#### Список источников

1. Абросимова О. О., Кулагин С. И. Особенности строения отложений кембрийского комплекса в пределах Мирнинского выступа (Непско-Ботуобинская антеклизы) // Известия Томского политехнического университета. 2010. Т. 316. № 1. С. 48–52.
2. Тузов Е. В. Проблематика бурения скважин в интервале трапповой интрузии на Среднеботуобинском месторождении // Строительство нефтяных и газовых скважин на суше и на море. 2021. № 2. С. 18–24. [https://doi.org/10.33285/0130-3872-2021-2\(338\)-18-24](https://doi.org/10.33285/0130-3872-2021-2(338)-18-24).
3. Акат'ев В. А., Близиуков В. Ю. Анализ горно-геологических условий и конструкций глубоких и сверхглубоких скважин // Строительство нефтяных и газовых скважин на суше и на море. 1997. № 3-4. С. 9–14.
4. Соболев В. С. Петрология траппов. Новосибирск: Наука, 1986. 209 с.
5. Фокин В. В., Поляков В. Н., Сонин В. Н., Кузнецов Р. Ю. Промысловый опыт борьбы с поглощениями в сложных геолого-технических условиях Восточной Сибири // Нефтегазовое дело. 2009. № 9. [Электронный ресурс]. URL: [http://ogbus.ru/files/ogbus/authors/Fokin/Fokin\\_1.pdf](http://ogbus.ru/files/ogbus/authors/Fokin/Fokin_1.pdf). (13.05.2021).
6. Шишин К. А. Главные проблемы технологии бурения скважин в Восточной Сибири // Совершенствование технологии бурения нефтяных и газовых скважин в Восточной Сибири и Якутии: сб. науч. тр. / отв. ред. В. В. Казанский. Новосибирск: Изд-во СНИИГГиМС, 1981. С. 3–10.
7. Акулов Н. И., Валеев Р. Р. Особенности геологического строения Среднеботуобинского нефтегазоконденсатного месторождения // Известия Иркутского государственного университета. Серия «Науки о земле». 2016. Т. 18. С. 3–13.
8. Беляков А. Ю., Чернокалов И. А., Макаров А. П., Горбов А. Н. Ликвидация поглощений в высокотрещиноватых трапповых долеритовых интрузивах Среднеботуобинского месторождения // Бурение и нефть. 2016. № 2. С. 44–47.
9. Близиуков В. Ю., Повалихин А. С. Классификация геологического разреза по условиям бурения его интервалов при проектировании рациональной конструкции поисково-разведочных скважин на месторождениях со сложными горно-геологическими условиями // Инженер-нефтяник. 2016. № 4. С. 17–25.
10. Близиуков В. Ю., Мыслук М. А. Выбор рациональной конструкции скважины в условиях неопределенности исходной информации // Нефтяное хозяйство. 1994. № 10. С. 15–17.
11. Булатов А. И., Измаилов Л. Б., Лебедев О. А. Проектирование конструкций скважин. М.: Недра, 1979. 280 с.
12. Тахавудинов Ш. Ф., Хисамов Р. С., Абдрахманов Г. С., Ахмадишин Ф. Ф., Пронин В. Е., Исмагилов Р. М. Совершенствование конструкции скважин // Нефтяное хозяйство. 2016. № 7. С. 40–43.
13. Близиуков В. Ю., Близиуков Ю. Н., Близиуков Вит. Ю., Дужик С. А. Совершенствование конструкций глубоких скважин. М.: ВНИИОЭНГ, 1991. 84 с.
14. Mouchet J. P., Mitchell A. *Abnormal pressures while drilling. Origins – prediction – detection – evaluation*. Paris: Editions Technip, 1989. 255 p.
15. Ашраф'ян М. О. Технология разобщения пластов в осложненных условиях. М.: Недра, 1989. 227 с.
16. Крылов В. И. Изоляция поглощающих пластов в глубоких скважинах. М.: Недра, 1980. 304 с.



17. Гайворонский А. А., Цыбин А. А. Крепление скважин и разобщение пластов. М.: Недра, 1981. 367 с.

18. Милосердов Е. Е., Ганиев Д. Ф. Герлинский П. В., Лемешов С. А., Дьяченко М. С., Измайлов А. П. [и др.]. Причины аварий и осложнений при бурении эксплуатационных скважин на месторождениях Восточной Сибири // Опыт, актуальные проблемы и перспективы развития нефтегазового комплекса: материалы Междунар. науч.-практ. конф. обучающихся, аспирантов и ученых. В 2 т. Т. 1. Тюмень: Изд-во ТИУ, 2017. С. 156–160.

19. Поляков В. Н., Мавлютов М. Р., Алексеев Л. А., Колодкин В. А. Технология и техника борьбы с поглощениями при строительстве скважин. Уфа: Китап, 1998. 187 с.

20. Поляков В. Н. Методы оценки и повышения герметичности и прочности ствола при бурении и заканчивании скважин в сложных геолого-технических условиях // Предупреждение и ликвидация осложнений при бурении глубоких скважин: тез. докл. краевой науч.-практ. конф. Красноярск, 1981. С. 39–41.

### Information about the authors / Информация об авторах



**Yevgeniy V. Tuzov,**

Head of Drilling Technology and Engineering Department,  
LLC Taas-Yuryakh Neftegazodobycha,  
Irkutsk, Russia,  
TuzovEV2@tyngd.rosneft.ru,  
<https://orcid.org/0000-0003-4149-8522>.

**Тузов Евгений Виссарионович,**

начальник Управления технологий и инжиниринга бурения,  
ООО «Таас-Юрях Нефтегазодобыча»,  
г. Иркутск, Россия,  
TuzovEV2@tyngd.rosneft.ru,  
<https://orcid.org/0000-0003-4149-8522>.



**Tatiana Yu. Kutuzova,**

Lead Specialist of the Drilling Technology Department,  
LLC Taas-Yuryakh Neftegazodobycha,  
Irkutsk, Russia,  
TY\_Kutuzova@tyngd.rosneft.ru,  
<https://orcid.org/0000-0002-3800-0618>.

**Кутузова Татьяна Юрьевна,**

ведущий специалист отдела инжиниринга бурения,  
ООО «Таас-Юрях Нефтегазодобыча»,  
г. Иркутск, Россия,  
TY\_Kutuzova@tyngd.rosneft.ru,  
<https://orcid.org/0000-0002-3800-0618>.

### Contribution of the authors / Вклад авторов

The authors contributed equally to this article.

Все авторы сделали эквивалентный вклад в подготовку публикации.

### Conflict of interests / Конфликт интересов

The authors declare no conflicts of interests.

Авторы заявляют об отсутствии конфликта интересов.

*The final manuscript has been read and approved by all the co-authors.*

*Все авторы прочитали и одобрили окончательный вариант рукописи.*

### Information about the article / Информация о статье

The article was submitted 02.06.2021; approved after reviewing 08.07.2021; accepted for publication 12.08.2021.

Статья поступила в редакцию 02.06.2021; одобрена после рецензирования 08.07.2021; принята к публикации 12.08.2021.



Научная статья

УДК 621.71

<https://doi.org/10.21285/2686-9993-2021-44-3-271-284>



## Динамическое модальное управление движением беспилотных транспортных средств в условиях открытых горных работ

Иван Владимирович Чичерин<sup>а</sup>, Борис Андреевич Федосенков<sup>б</sup>

<sup>а,б</sup>Кузбасский государственный технический университет им. Т. Ф. Горбачева, г. Кемерово, Россия

Автор, ответственный за переписку: Федосенков Борис Андреевич, rafwaveletsve@mail.ru

**Резюме.** Целью данного исследования являлось представление ряда аспектов современной концепции автоматизированного динамического модального управления карьерными беспилотными транспортными средствами в условиях открытых горных работ. В частности, в программно-аппаратный комплекс, входящий в состав глобальной структуры «Умный карьер», заложены условия соответствия формы определенных текущих траекторий (их девиации влево или вправо от номинальной осевой траектории) информационным «траекторным» чирп-сигналам. В ходе исследования были использованы методы вейвлет-преобразований одномерных сигналов, формирующих текущие траектории беспилотных транспортных средств, в формат время-частотных распределений класса Козна. Схематично рассмотрено формирование текущих траекторий беспилотного транспортного средства при их девиации влево / вправо от номинальной осевой траектории на прямолинейных и искривленных маршрутах. Отмечено, что отслеживание текущих траекторий на карьерных маршрутах осуществляется с учетом характера траекторных сигналов. Сформулировано отличие вводимого в рассмотрение динамического модального управления беспилотного транспортного средства от статического. В подсистемы автономного и внешнего управления введены фрагменты, отображающие 1D-сигналы в вейвлет-среде. При этом в автоматизированной системе управления используются такие элементы аппарата вейвлет-преобразований, как вейвлет-функции Габора, алгоритм вейвлет-поиска соответствия, время-частотные распределения класса Козна. В результате исследований были сформулированы критерии формирования текущих траекторий системой управления в виде ее реакций на спорадические возмущения, вызванные возникновением на маршруте статических или динамических препятствий. Разработан алгоритм динамического модального управления текущими траекториями. Введено понятие прямых и обратных переходных процессов сигналов девиации траекторий беспилотного транспортного средства. Описана процедура оценки параметров модального регулятора. Разработан алгоритм пересчета матрицы модального регулятора в виде цепочки последовательно реализуемых матричных процедур. В заключение отметим, что на основе проведенных исследований разработана автоматизированная система модального управления процессом девиации текущих траекторий, позволяющая выполнять функции управления динамикой оперативного и безопасного траекторного перемещения беспилотных транспортных средств по карьерным маршрутам в конфликтной среде открытых горных работ.

**Ключевые слова:** карьерные маршруты, беспилотные транспортные средства, динамическое модальное управление, траектории, девиация, вейвлеты

**Финансирование:** работа выполнена при финансовой поддержке Министерства науки и высшего образования Российской Федерации в рамках соглашения № 075-11-20 19-034 от 22.11.2019 г. с ПАО «КАМАЗ» по комплексному проекту «Разработка и создание высокотехнологичного производства автономных тяжелых платформ для безлюдной добычи полезных ископаемых в системе «Умный карьер»», при участии Кузбасского государственного технического университета им. Т. Ф. Горбачева в части выполнения научно-исследовательских, опытно-конструкторских и технологических работ.

**Благодарности:** авторы выражают благодарность сотрудникам Института информационных технологий, машиностроения и автотранспорта Кузбасского государственного технического университета им. Т. Ф. Горбачева за содействие в подготовке публикации.

**Для цитирования:** Чичерин И. В., Федосенков Б. А. Динамическое модальное управление движением беспилотных транспортных средств в условиях открытых горных работ // Науки о Земле и недропользование. 2021. Т. 44. № 3. С. 271–284. <https://doi.org/10.21285/2686-9993-2021-44-3-271-284>.



## Original article

## Dynamic modal control of unmanned vehicle movement in open pit mining

Ivan V. Chicherin<sup>a</sup>, Boris A. Fedosenkov<sup>b</sup>

<sup>a,b</sup>T. F. Gorbachev Kuzbass State Technical University, Kemerovo, Russia

Corresponding author: Boris A. Fedosenkov, rafwaveletsve@mail.ru

**Abstract.** The purpose of this study is to present a number of aspects in the modern concept of computer-aided dynamic modal control of unmanned quarry vehicles in open pit mining. In particular, the software and hardware module that is a part of the “Smart Quarry” global structure deals with the conditions of matching a form of specific current trajectories (their deviation to the left or right of the nominal axial trajectory) to information “trajectory” chirp signals. The study employs the methods of wavelet transforms to convert one-dimensional signals that generate unmanned vehicle current trajectories into the time-frequency distributions of Cohen’s class. The formation of unmanned vehicle current trajectories under their deviation to the left / right from the nominal axial trajectory on straight and curved routes is considered schematically. It is noted that the tracking of unmanned current trajectories on quarry routes is carried out taking into account the nature of trajectory signals. The difference between the introduced dynamic modal control of the unmanned vehicle and the static one is formulated. Some fragments displaying 1D-signals in a wavelet medium are introduced into the autonomous and external control subsystems. The computer-aided control system uses such elements of the wavelet transforms technique as Gabor wavelet functions, the wavelet matching pursuit algorithm, and Cohen’s class time-frequency distributions. The research results in formulating the criteria for forming the unmanned vehicle current trajectories by the control system in the form of its reactions to sporadic disturbances caused by the occurrence of static or dynamic obstacles on a route. The algorithm of dynamic modal control of current trajectories has been developed. The concept of forward and reverse transient processes of signals of unmanned vehicle trajectory deviation has been introduced. The estimation procedure of modal controller parameters has been described. The algorithm has been developed for modal controller matrix recalculation, which has the form of the chain of sequentially implemented matrix procedures. It should be noted in conclusion that a computer-aided system for modal control of current trajectory deviation has been developed on the basis of the performed research. It enables to implement the functions of controlling the dynamics of technological and safe movement of unmanned vehicles along the quarry routes in a conflict environment of open pit mining.

**Keywords:** quarry routes, unmanned vehicles, dynamic modal control, trajectories, deviation, wavelets

**Funding:** the work was carried out with the financial support from the Ministry of Science and Higher Education of the Russian Federation under the agreement No. 075-11-20 19-034 of November 22, 2019 and the Public Joint Stock Company KAMAZ on the complex project “Development and creation of high-tech production of autonomous heavy platforms for unmanned mining in the Smart Quarry system”, with the participation of the Federal State-funded Educational Institution of Higher Education T. F. Gorbachev Kuzbass State Technical University in the implementation of research and development works and technological works.

**Acknowledgements:** the authors express their gratitude to the staff of the T. F. Gorbachev Kuzbass State Technical University (Institute of Information Technologies, Mechanical Engineering, and Motor Transport) for their assistance in publication preparation.

**For citation:** Chicherin I. V., Fedosenkov B. A. Dynamic modal control of unmanned vehicle movement in open pit mining. *Nauki o Zemle i nedropol'zovanie = Earth sciences and subsoil use*. 2021;44(3):271-284. (In Russ.). <https://doi.org/10.21285/2686-9993-2021-44-3-271-284>.

### Введение

Для устойчивого и эффективного развития горных территорий, на которых размещены горнорудные предприятия, в том числе угольные и рудные разрезы для открытой добычи полезного ископаемого, весьма важным фактором является внедрение новейшей горно-транспортной техники, к которой относится получающее все большее распространение автономное транспортное оборудование и в

первую очередь беспилотные автосамосвалы большой и сверхбольшой грузоподъемности. В связи с этим научная теоретическая и практическая формы исследования поведения такого рода объектов в конфликтной среде представляют собой чрезвычайно актуальные аспекты функционирования современных производственных систем.

В представленном исследовании рассмотрены принципы динамического модального



управления передвижением беспилотных транспортных средств (БТС) [1–5]<sup>1</sup> по прямым и искривленным технологическим маршрутам в карьерах в условиях открытых горных работ. Технологические маршруты задаются в так называемом формате сплайн-фреймов (S-фреймов) [6, 7], то есть в формате полос движения в виде искривленных (выпуклых или вогнутых) сплайн-окон.

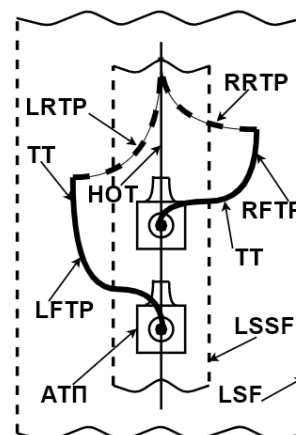
### Материалы и методы исследования

Рассмотрим вопросы, связанные с характеристиками сигналов, формируемых в программно-аппаратном комплексе производственной структуры «Умный карьер» и отражающих динамику текущих траекторий (ТТ) БТС на технологических маршрутах.

В директориях программно-аппаратного комплекса заложены условия соответствия динамики определенной ТТ, то есть ее девиации влево / вправо от номинальной осевой траектории (НОТ), информационным «траекторным» синусоидально подобным сигналам  $x(t)$ : влево – сигнал с падающей мгновенной частотой, вправо – с возрастающей. В теории обработки сигнальной информации такого рода сигналы именуются «чирп-сигналами» [8, 9], то есть сигналами, изменяющимися с мгновенной время-зависимой частотой.

На рис. 1 на прямом S-фрейме изображены две девиационные ТТ с указанием прямых (отклоняющихся от НОТ) и обратных (возвращающихся к НОТ) ТТ. В программно-аппаратном комплексе, входящем в состав автоматизированной системы диспетчеризации структуры «Умный карьер», прямым и обратным переходным процессам, как указано выше, ставятся в соответствие одномерные (скалярные) информационные чирп-сигналы – сигналы  $x(t)$  с время-зависимой частотой. По характеру этих сигналов, а также по их многомерным вейвлет-отображениям [8, 9] в подсистемах внешнего (в составе автоматизированной системы диспетчеризации) и автономного (установленного на борту БТС) управления (ПСВУ и ПСАУ) осуществляется процесс

формирования и отслеживания ТТ перемещения БТС по соответствующему маршруту в карьере.



**Рис. 1. Схема возникновения возмущенных прямых (девиационных) и формирования обратных восстанавливающих траекторий беспилотного транспортного средства на прямом участке S-фрейма при уходе текущих траекторий влево и вправо от номинальной осевой траектории**  
**Fig. 1. Diagram of origin of disturbed forward (deviation) trajectories and formation of reverse restoring trajectories of an unmanned vehicle on the straight section of the S-frame when a current trajectory moves to the left and right of the nominal axial trajectory**

**Принцип статического модального управления.** Статическое модальное управление [10–12] подразумевает принудительное размещение полюсов объекта управления на комплексной плоскости с помощью матрицы полной обратной связи по состоянию [10, 12]. Объектом управления здесь является сигнал о ТТ БТС на маршруте. Принудительное размещение полюсов необходимо для удовлетворения требования обеспечить соответствующее качество регулирования [11, 12], то есть формирование определенной ТТ на маршруте.

**Принцип динамического модального управления.** Отличие динамического модального управления от статического состоит в том, что во время переходного процесса происходит смена локализации ряда полюсов на комплексной плоскости, то есть переформатирование созвездия полюсов. Это, в свою

<sup>1</sup> SAE J3016. Taxonomy and definitions for terms related to driving automation systems for on-road motor vehicles: ground vehicle standard. SAE International, 2016. Issued: January 2014; revised: September 2016. 30 p.



очередь, ведет к варьированию качества регулирования в связи с изменением характера переменных состояния [12] объекта управления. Такое варьирование обуславливается динамическим изменением значений элементов матрицы обратной связи. Подобное динамическое изменение формы созвездия полюсов приводит к динамическому изменению ТТ БТС.

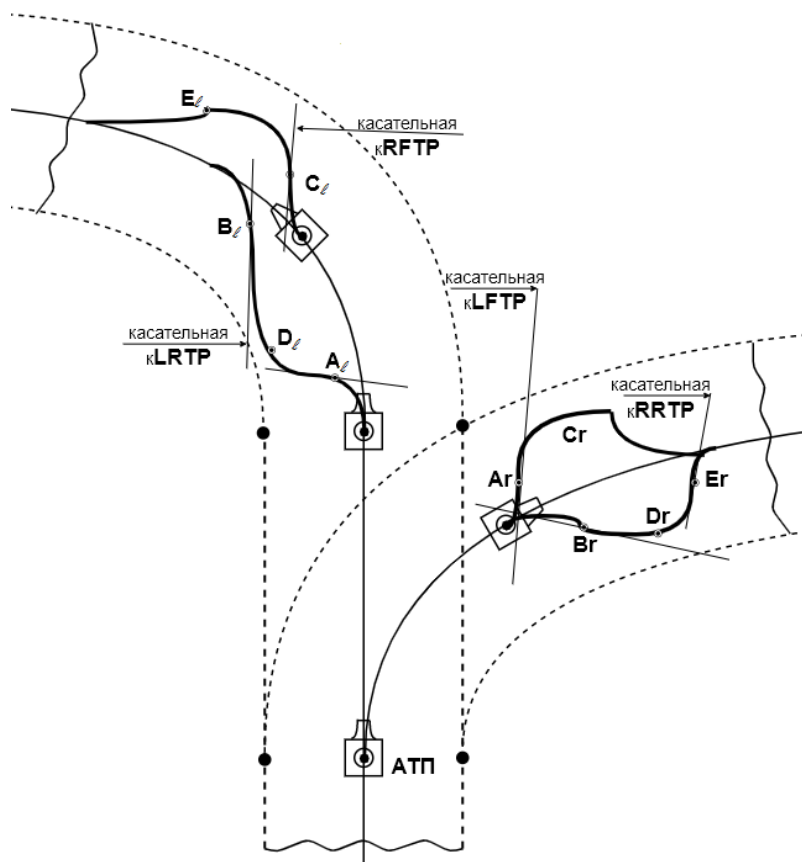
*Формирование девиационных текущих траекторий.* Рассмотрим подробнее процесс формирования ТТ при их девиациях от НОТ.

На рис. 1 приведены следующие обозначения: LSF (local spline frame) – локальный S-фрейм; LSSF (local sub-spline frame) – локальный суб-S-фрейм; АТП – автономная тяжелая платформа (БТС); НОТ – номинальная осевая траектория движения АТП; LFTP / RFTP (left forward transient process / right forward transient process) – соответственно прямые переходные процессы девиации ТТ движения БТС влево / вправо от НОТ; LRTP / RRTP (left reverse transient process / right reverse transient

process) – соответственно обратные переходные процессы восстановления НОТ при девиации ТТ движения БТС влево / вправо от НОТ.

На рис. 2 в совмещенном виде схематично изображены искривленные S-фреймы с ТТ, уходящими влево и вправо от НОТ. Сплошными тонкими линиями изображены две линии НОТ движения БТС.

На фрагменте S-фрейма, уходящего по кривой вправо, точками  $A_r$  и  $B_r$  отмечены точки перегиба сигнала левой и правой прямой траекторий, а точкой  $E_r$  – точка перегиба на правой обратной траектории. На маршруте с левым искривлением аналогичные точки перегиба на левой и правой прямой траекториях – это точки  $A_l$  и  $B_l$ , а точкой  $C_l$  отмечена точка перегиба на правой прямой девиационной траектории. Точки перегиба на ТТ удовлетворяют траекториям, формируемым в соответствии с апериодическим процессом второго порядка [11, 12]. К ним относятся ТТ с сигналами, соответствующими левым прямому и обратному переходным процессам, а также



**Рис. 2. Искривленные S-фреймы с текущими траекториями, уходящими влево и вправо от номинальной осевой траектории, изображенные в совмещенном виде**  
**Fig. 2. Curved S-frames with current trajectories moving to the left and right of the nominal axial trajectory shown in a combined form**



правому прямому на маршруте с левым искривлением. На маршруте с правым искривлением по апериодическому процессу второго порядка формируется траекторный сигнал на левом прямом участке ТТ, а на правой девиационной траектории – на ее прямом и обратном участках.

Точки активации процедуры модального управления – это точки  $C_r$  и  $D_r$  на левой и правой траекториях соответственно. Точки активации модального управления на девиационных ТТ БТС на маршруте с левым искривлением отмечены как  $D_l$  и  $E_l$  соответственно на ТТ, отклонившейся влево / вправо от НОТ.

Обратный переходный процесс в режиме модального управления для левой девиационной траектории на S-фрейме с правым искривлением, формируемый в режиме апериодического процесса первого порядка, имеет такой же характер, как и для правой девиационной ТТ на S-фрейме с левым искривлением.

С целью информативно полной и семантически прозрачной обработки сигналов в ПСАУ и ПСВУ в программные комплексы последних введены фрагменты, обеспечивающие формирование вейвлет-преобразований с их элементами: вейвлет-функциями [9, 13–15], алгоритмом вейвлет-поиска соответствия [9, 16], квадратичными вейвлет-распределениями класса Козна [9, 17–19].

### Результаты исследования и их обсуждение

*Переходные процессы в сигналах девиационных текущих траекторий.* Следует отметить, что формирование девиационных ТТ обусловлено возникновением на рабочем маршруте динамического препятствия, например в виде группы идущих людей, стационарного препятствия типа временно установленных средств освещения, электротехнических распределительных устройств с воздушным / кабельным отведением или лежащих на дорожном полотне негабаритных кусков породы / угля.

Объезд транспортным средством динамического или статического препятствия выполняется с учетом следующих положений.

1. Сигнал девиационной ТТ рассматривается состоящим из двух участков (переходных

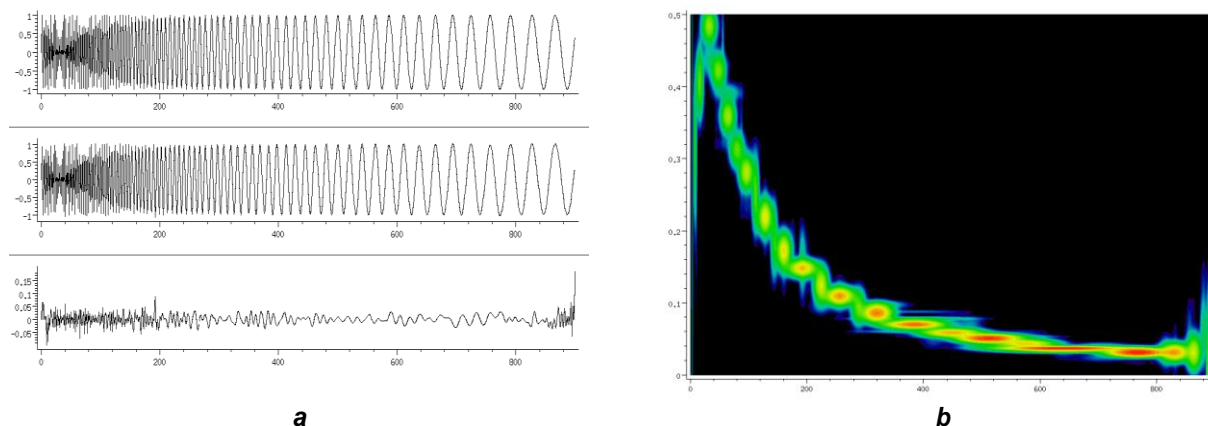
процессов): начального участка траектории в виде прямого переходного процесса и конечного – в виде обратного переходного процесса. Начальный участок траекторного сигнала представляет собой автономно-спорадический процесс, конечный – принудительно-модальный.

В зависимости от стороны объезда препятствия одномерный траекторный чирп-сигнал формируется либо с падающей мгновенной частотой (рис. 3), что соответствует отклонению ТТ влево от НОТ, либо с возрастающей (рис. 4) – при этом ТТ БТС отклоняется вправо от НОТ.

На рис. 3, а показан прямой переходный процесс для девиационной траектории БТС при ее отклонении влево от НОТ в центрированном виде; здесь же представлен реконструированный по алгоритму вейвлет-поиска соответствия (ВПС-алгоритму) траекторный сигнал этого режима, а также ошибка аппроксимации. При этом сигнал прямого переходного процесса имеет вид чирп-сигнала с падающей время-зависимой мгновенной частотой. На рис. 3, б приведена карта Вигнера (время-частотное распределение Вигнера) [9, 16, 20] этого процесса.

На рис. 4, а представлен прямой переходный процесс для девиационной ТТ БТС при ее отклонении вправо от НОТ в центрированном виде; здесь же – реконструированный траекторный сигнал этого режима и ошибка аппроксимации. При этом сигнал прямого переходного процесса имеет вид чирп-сигнала с возрастающей время-зависимой мгновенной частотой. На рис. 4, б приведена карта Вигнера переходного процесса в виде время-частотного распределения.

На вейвлет-карте (W-карте, см. рис. 4, б) динамики ТТ БТС показан зафиксированный экспериментально восходящий прямой переходный процесс (ВППП), то есть автономно-спорадический (АСПП), при реализации начального участка девиационной ТТ БТС при ее отклонении вправо от НОТ в формате вейвлет-распределения Вигнера. В частности, при этом мгновенная частота чирп-сигнала переходного процесса меняется в диапазоне 3,24–6,13 Гц.



**Рис. 3. Одномерный траекторный сигнал для девиационной траектории беспилотного транспортного средства при ее отклонении влево от номинальной осевой траектории:**

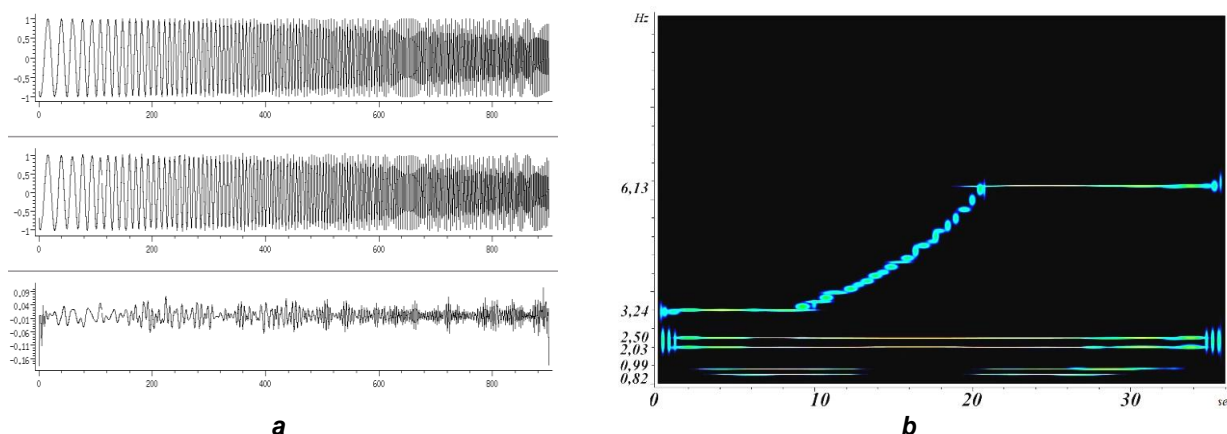
*a – исходный сигнал, его аппроксимация и ошибка аппроксимации;*

*b – карта Вигнера сигнала в переходном режиме*

**Fig. 3. One-dimensional trajectory signal for the unmanned vehicle deviation trajectory when the latter deviates to the left of the nominal axial trajectory:**

*a – initial signal, its approximation, and approximation error;*

*b – Wigner map of the signal in the transient mode*



**Рис. 4. Одномерный траекторный сигнал для девиационной траектории беспилотного транспортного средства при ее отклонении вправо от номинальной осевой траектории:**

*a – исходный сигнал, его аппроксимация и ошибка аппроксимации;*

*b – карта Вигнера сигнала в переходном режиме*

**Fig. 4. One-dimensional trajectory signal for the unmanned vehicle deviation trajectory when the latter deviates to the right of the nominal axial trajectory:**

*a – initial signal, its approximation, and approximation error;*

*b – Wigner map of the signal in the transient mode*

Кроме время-частотного распределения ВППП, который вызван воздействием на ПСАУ БТС спорадического возмущения, обусловленного наличием какого-либо препятствия на пути БТС, на W-карте в совмещенном виде также отображены время-частотные распределения ТТ БТС, движущихся по прямым траекториям, которые соответствуют траекторным сигналам (ТТ-сигналам), то есть сигналам, соответствующим динамике ТТ, с частотами 2,5 и 2,03 Гц. Кроме того, здесь же

представлены время-частотные распределения сигналов, определяющих движение БТС по прямым траекториям в старт-стопных режимах на частотах 0,99 и 0,82 Гц при преодолении препятствий в виде выбоин, кочек и тому подобных ухабов без изменения траектории перемещения.

Отметим, что восходящий обратный переходный процесс (ВОПП), то есть принудительно-модальный (ПМПП), принят в автоматизированной системе модального управления





таким же по форме, что и ВППП на начальном участке ТТ БТС, с целью формирования процессов, восстанавливающих номинальную ТТ БТС, в естественном виде – с точки зрения функционирования электроприводов ходовой части.

2. Выбор автоматизированной системой (ее комплексами ПСВУ или ПСАУ) направления объезда (влево / вправо от препятствия) осуществляется при параметрах, приведенных на рис. 5: здесь  $W$  – фронтальный размер препятствия;  $F_{min}$  – минимальное расстояние на виде в плане между передним бампером БТС и ближайшей к нему допустимой точкой препятствия;  $A_r$  – точка активации процесса модального управления;  $V$  – расстояние от линии НОТ до правой крайней точки препятствия на его фронтальной проекции; АСПП – автономно-спорадический переходный процесс (соответствует начальному участку девиационной траектории); ПМПП – принудительно-модальный (соответствует конечному участку девиационной траектории). Активация принудительно-модального процесса возникает в точке максимального отклонения  $x(t)_{max}$  девиационной траектории под влиянием автономно-спорадического возмущения.

При фиксации лидарно-радарно-сонарным узлом ПСАУ БТС критериального значения расстояния до препятствия  $F_{min}$  система проверяет выполнение соотношений:  $V < W/2$  – в этом случае объезд выполняется справа, или  $V > W/2$  – объезд слева.

При объезде препятствия беспилотником ПСАУ формирует девиационную траекторию в соответствии с аperiodическим процессом

второго порядка [11, 12, 16], обеспечивая тем самым плавность и аккуратность объезда. Подобная форма объезда дает возможность избежать столкновения БТС с бортом уступа, находящимся справа, а для возвратного движения БТС в забой или для встречного беспилотного автосамосвала – падения с уступа.

Как указано выше, на рис. 5 схематично показана траектория, которую формирует сигнал ПМПП. Окончание такого обратного процесса фиксируется в момент регистрации значения ошибки рассогласования сигнала ТТ с сигналом-линией НОТ в коридоре 5 % от значения траекторного сигнала  $x(t)_{max}$  в момент активации процесса модального управления.

При начале процесса девиации ТТ БТС, вызванного автономно-спорадическими возмущениями, необходимо обеспечить снижение скорости БТС по обратной двухэкспоненциальной зависимости (вначале – медленное снижение, затем падение достигает своего максимального значения, после чего темп снижения скорости – ее производная – падает; скорость при этом стабилизируется на новом, пониженном уровне).

Заметим, что резко изменять скорость БТС в момент начала девиации (например, начать формировать ее по типу переходной характеристики, соответствующей аperiodическому закону первого порядка) нельзя, ибо это будет означать резкое торможение БТС в момент начала объезда препятствия, что может повлечь за собой возникновение возмущений в виде опасного крена / опрокидывания БТС, а также негативного воздействия на перевозимый груз и пассажиров.

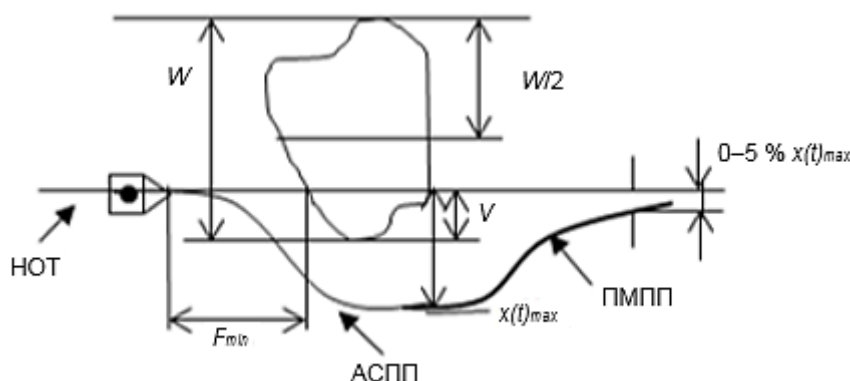


Рис. 5. Схема взаимного расположения беспилотного транспортного средства и препятствия на его пути с наложенным изображением правой девиационной траектории  
Fig. 5. Diagram of relative position of the unmanned vehicle and an obstacle in its way with the overlay image of the right deviation trajectory



В момент активации процесса модального управления скорость БТС может быстро возрасти – при левой девиации – по апериодическому процессу первого порядка [11, 16], чтобы избежать столкновения со встречным БТС. Но скорость БТС можно увеличивать и более плавно – когда лидарно-радарно-сонарный узел бортовой подсистемы ПСАУ не обнаруживает встречного БТС или другого транспорта на значительном расстоянии (критерии этих понятий в зависимости от текущей мгновенной скорости БТС вводятся в ПСАУ и ПСВУ априори) от рассматриваемого БТС.

При правой девиации ТТ БТС от НОТ в момент активации АСПП скорость БТС может снижаться относительно быстро (в соответствии с апериодическим процессом первого порядка), если размер  $V \ll W/2$  (см. рис. 5). Это означает, что девиация на начальном участке ТТ БТС будет незначительной относительно НОТ. ПМПП, связанный с увеличением скорости БТС, можно при этом проводить по любому из двух сценариев: быстрому или медленному.

В случае же  $V \approx W/2$  БТС также должно снижать свою скорость, но вследствие вынужденного крутого правого поворота на начальном участке (в переходном процессе АСПП) – более плавно, в соответствии с апериодическим процессом второго порядка. ПМПП должен протекать по апериодическому процессу первого порядка, при этом более скоростной возврат ТТ БТС к линии НОТ позволяет избежать столкновения с правым бортом уступа или падения с уступа при противоположном расположении борта. При противоположных соотношениях  $V$  и  $W/2$  системой формируется сигнал на объезд препятствия слева.

*Алгоритм управления текущими траекториями беспилотного транспортного средства.* Управление процессами динамического формирования ТТ БТС в автоматизированной системе производится в вейвлет-среде [4]<sup>2</sup> на основе алгоритма динамического модального управления (рис. 6). Следует отметить, что в этом алгоритме помимо принудительно-модальных процедур заложены также и процедуры реализации автономно-

спорадических переходных процессов с их обработкой в вейвлет-среде. При этом результаты обработки далее используются для формирования предстоящего ПМПП. Целью данного алгоритма является динамическое формирование прямого и обратного переходных процессов сигналов девиации ТТ БТС.

На рис. 6 приведена блок-схема алгоритма модального управления процессом формирования ТТ БТС. Здесь обозначения таковы: W-карта – формат отображений 1D-сигналов в виде распределений класса Коэна; ЭПХЧ – электропривод ходовой части; НОТ – номинальная осевая траектория; ТТ – текущая(-щие) траектория(-рии); ТТ-сигнал – траекторный сигнал, то есть сигнал, соответствующий динамике ТТ;  $Q_c^{-1}$  – обратная матрица управляемости;  $f_d$  – частота траекторного сигнала при девиации ТТ;  $U_n$  – текущее напряжение, подаваемое на электропривод ходовой части; БТС – беспилотное(-ные) транспортное(-ные) средство(-ва).

В блоках 1 и 2 соответственно производятся регистрация номинального режима и его многомерное отображение в виде карты Вигнера (W-карты). В блоке 3 осуществляется задание фрейма для номинального режима движения БТС. Процедура в блоке 4 отвечает за разграничение двух типов прямых переходных процессов: возникновение эффекта автономно-спорадической девиации ТТ БТС либо влево от НОТ (выход «да»), либо вправо (выход «нет»). В блоках 5, 17 производится регистрация одномерного траекторного chirp-сигнала БТС, соответствующего переходному процессу девиации ТТ относительно НОТ соответственно с падающей и возрастающей частотой. При этом в первом случае ТТ отклоняется влево относительно НОТ, во втором – вправо. В блоках 6 и 18 системой выполняются операции расчета W-карт возмущенных режимов и фиксация их отображений относительно номинальных фреймов. В процедурах блоков 7–10 для левой девиации ТТ и блока 19 для правой реализуются операции по определению параметров ВОПП, то есть постоянных  $T_1$  и  $T_2$  (см. рис. 6), и нисходящего обратного переходного процесса (НОПП) (постоянной  $T$ ).

<sup>2</sup> SAE J3016. Taxonomy and definitions for terms related to driving automation systems for on-road motor vehicles: ground vehicle standard. SAE International, 2016. Issued: January 2014; revised: September 2016. 30 p.

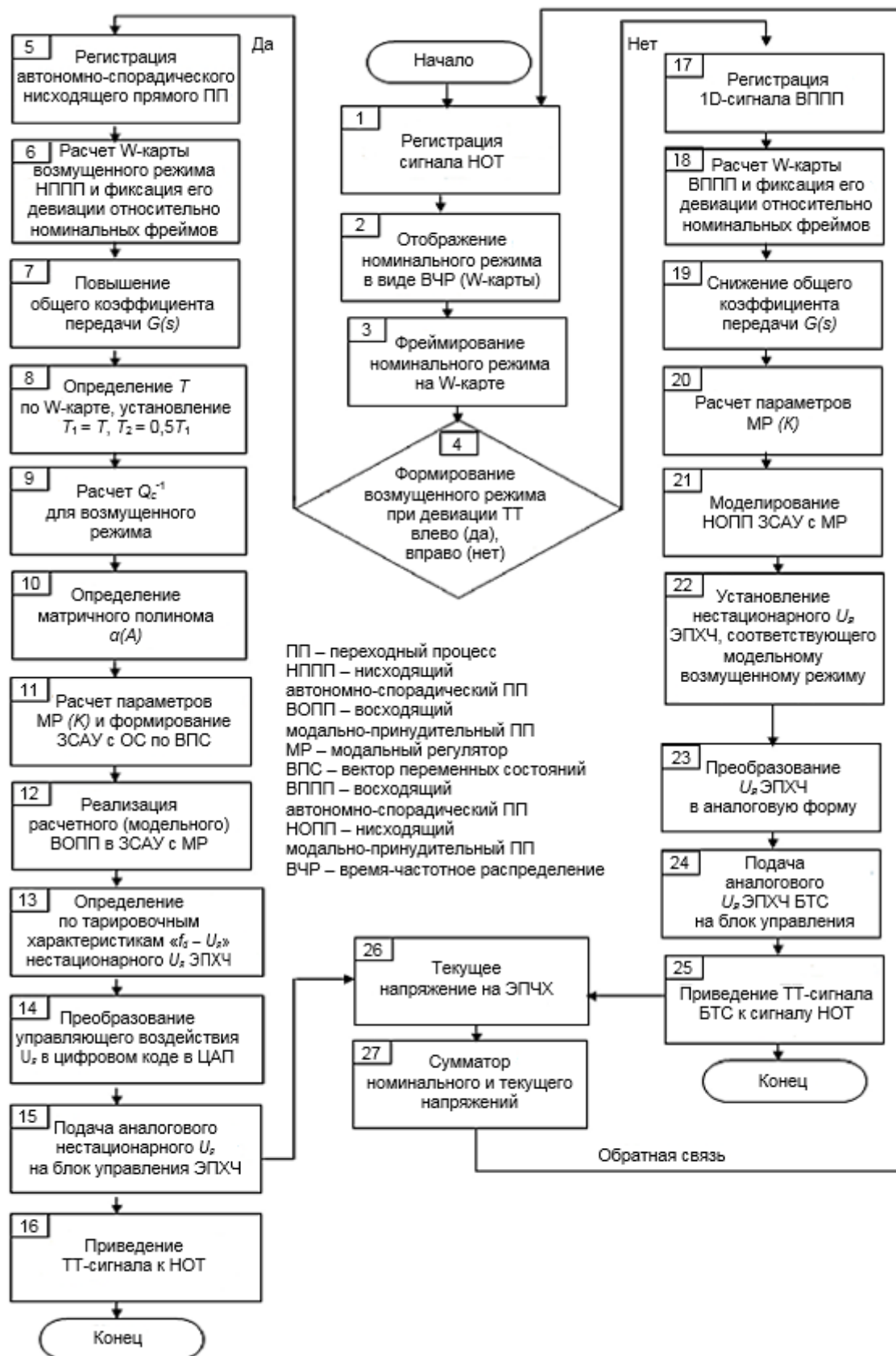


Рис. 6. Блок-схема алгоритма управления динамикой девиации текущей траектории беспилотного транспортного средства при ее отклонении влево / вправо от номинальной осевой траектории  
Fig. 6. Block diagram of the control algorithm of the deviation dynamics of the unmanned vehicle current trajectory when it deviates to the left / right from the nominal axial trajectory



Блоки 11 и 20 отвечают за выполнение расчетов параметров модального регулятора (элементов матрицы  $K$  в цепи обратной связи по состоянию). В блоках 12 и 21 реализуются процессы моделирования обратных переходных процессов в замкнутой системе автономного управления с модальным регулятором. В блоках 13 и 22 выполняется определение текущего нестационарного напряжения на электроприводе ходовой части БТС. В блоках 14, 23 и 15, 24 производятся операции по преобразованию в цифро-аналоговом преобразователе цифрового сигнала напряжения в аналоговую форму и подаче напряжения электропривода ходовой части на блок управления. Функции блоков 16, 25, 26 и 27 заключаются в восстановлении НОТ для БТС.

*Оценка параметров модального регулятора.* Разработан алгоритм пересчета матрицы модального регулятора в виде цепочки последовательно реализуемых матричных процедур (см., например, блоки 8–12 на рис. 6 для случая девиации ТТ БТС влево относительно НОТ). При этом отметим следующее: для левой девиационной траектории восстанавливающий ВОПП происходит под действием двух увеличенных постоянных времени по двухэкспоненциальной зависимости, которые назначаются автоматизированной системой и остаются постоянными, при этом оба вещественных отрицательных полюса переходного процесса поджимаются к мнимой оси  $j\omega$   $S_p$  (это соответствует более плавному переходу из области максимальной девиации в область восстановления сигнала НОТ, а пара мнимых полюсов динамической модели ТТ БТС должна расходиться по мнимой оси и непрерывно меняться в ходе ПМПП. При этом нужно помнить, что на восстанавливающий аperiodический скалярный сигнал накладывается синусоидально подобная chirp-составляющая, отвечающая за ориентацию девиации ТТ БТС относительно НОТ.

Для правой девиационной ТТ БТС при НОПП, имеющем вид импульсной переходной характеристики аperiodического звена первого порядка, процесс идет под действием уменьшенной постоянной времени  $T$ , поскольку выйти из области максимальных девиационных значений траекторного сигнала в

сторону его номинальных значений следует значительно быстрее вследствие необходимости обеспечить безопасность перемещения БТС по маршруту. Поэтому вещественный отрицательный полюс по модулю должен вырасти и оставаться постоянным в течение всего процесса восстановления номинального режима, а пара мнимых полюсов – сближаться и оставаться варьируемыми во время переходного процесса.

Таким образом, реализация переменной составляющей ВОПП при левой восстанавливающей девиации ТТ определяется пятью полюсами (двумя мнимыми, соответствующими центрированному синусоидальному траекторному сигналу, одним нулевым и двумя вещественными отрицательными, характеризующими переходную характеристику аperiodического звена второго порядка), а НОПП при правой девиации, восстанавливающей НОТ-сигнал – тремя (двумя мнимыми, также характеризующими центрированный синусоидальный ТТ-сигнал, и одним нулевым, соответствующим импульсной переходной характеристике аperiodического звена первого порядка).

Следует отметить, что все переходные процессы в траекторных сигналах являются структурно и параметрически нестационарными, то есть протекают в среде с изменяемой структурой полюсов и с время-зависимыми мгновенными частотами в виде chirp-сигналов. Структурная нестационарность определяется введением в объект управления (то есть в сигналы, соответствующие ТТ БТС) дополнительных полюсов, а параметрическая характеризуется непрерывной варьированностью значений мнимых сопряженных полюсов во время переходных процессов в ТТ-сигналах.

Ниже в качестве примера рассмотрена процедура реализации алгоритма модального управления процессом формирования девиационных ТТ БТС, в том числе технология принудительной локализации и релокализации полюсов разомкнутой системы автономного управления в условиях нестационарных процессов в системе «электропривод – ходовая часть БТС», в возмущенном режиме при правой восстанавливающей номинальный ТТ-





сигнал девиации (при переходном процессе типа НОПП). В данном примере используется нецентрированный траекторный сигнал, при этом рассматриваемая система имеет четвертый порядок.

Расчет параметров модального регулятора, то есть определение матрицы обратной связи  $K$  по полному вектору переменных состояния, сводится к ее расчету по формуле Аккермана [21], представляющей собой произведение трех матриц: первой – вспомогательной, второй – блочной и третьей – полиномиальной:

$$K = [0 \ 0 \ 0 \ 1] \cdot Q_c^{-1} \cdot \alpha(A),$$

где  $Q_c^{-1}$  – обратная матрица управляемости:  $\alpha(A)$  – матричный полином, сформированный в соответствии с теоремой Кэيلي – Хэмилтона [12] путем замены в характеристическом полиноме переменной Лапласа  $s$  на матрицу

$$\alpha(A) = \begin{bmatrix} 0 & -T^{-1}\omega^2 + 1 & -\omega^2 + 1 & \\ 0 & -\omega^2(T^{-2} + T^{-1}) & -\omega^2 + 1 & \\ 0 & \omega^4 T^{-1} - \omega^2(T^{-2} + T^{-1}) & \omega^2(\omega^2 - 1) & \\ 0 & \omega^2(\omega^2 - 1)(T^{-2} + T^{-1}) & \omega^2(\omega^2 - 1) & \omega^2(\omega^2 - T^{-2}) - \omega^2(T^{-1} - 1) + T^{-4} - T^{-3} + (T^{-2} - T^{-1}) \end{bmatrix}.$$

По виду  $\alpha(A)$  можно заметить, что в объекте управления влияние на переходный процесс имеют два мнимых сопряженных полюса (они в динамике варьируют частоту  $\omega$  траекторного chirp-сигнала) и вещественный отрицательный, соответствующий параметру  $T$ ,

$$K = [0 \ 0 \ 0 \ 1] Q_c^{-1} \alpha(A) = \left[ 0 \mid (T^{-1}\omega^2 - 1) \mid (\omega^2 - 1) \mid (T^{-1} - 1) \right] = [K_1 \mid K_2 \mid K_3 \mid K_4].$$

Данная матрица непрерывно пересчитывается с задаваемым временным шагом в ходе переходного процесса, чтобы обеспечить его chirp-характер.

### Заключение

Рассчитываемые параметры модального регулятора позволяют задавать требуемые варьируемые полюсы замкнутой системы управления с полной обратной связью по состоянию, которые определяет автоматизиро-

состояния  $A$ ;  $Q_c = [B \mid AB \mid \dots \mid A^{n-1}B]$  – матрица управляемости, где  $A$  и  $B$  – матрицы состояния и управления.

Оценка управляемости разомкнутой системы автономного управления (объекта в возмущенном режиме) по критерию Калмана – Луенбергера [11, 12]: так как  $\text{rank } Q_c = n$  (порядок объекта), или  $\det Q_c \neq 0$ , то система полностью управляема, поэтому полюсы объекта могут быть размещены в любых точках  $s$ -плоскости принудительно при замыкании объекта многомерной обратной связью по состоянию в виде матрицы  $K$ .

Тогда обратная матрица управляемости  $Q_c^{-1}$  определяется как

$$Q_c^{-1} = \text{Adj}(A \lg Q_c^T) / \det Q_c.$$

Следовательно, матричный полином имеет вид  $\alpha(A) = A^4 - d_1 A^3 + d_2 A^2 - d_3 A + d_4 I$ , где  $I$  – единичная матрица.

которые формируют частотную составляющую, а также определяют быстродействие процедуры компенсации отклонения траектории БТС от НОТ.

В результате получаем матрицу  $K$  модального регулятора вида

ванная система модального управления по заданному алгоритму (см. рис. 6).

Таким образом, разработанная автоматизированная система модального управления процессом девиации ТТ выполняет функции управления динамикой оперативного и безопасного траекторного перемещения БТС по карьерным маршрутам в условиях открытых горных работ, что, в свою очередь, способствует проведению производственного процесса на эффективном и безопасном уровне.

### Список источников

1. Cheng H. Autonomous intelligent vehicles: theory, algorithms, and implementation. Springer-Verlag London, 2011. 154 p.

2. Autonomous control systems and vehicles: intelligent unmanned systems / eds. K. Nonami, M. Kartidjo, K.-J. Yoon, A. Budiyo. Springer Japan, 2013. 315 p.



3. Naranjo J. E., Clavijo M., Jiménez F., Gómez O., Rivera J. L., Anguita M. Autonomous vehicle for surveillance missions in off-road environment // 2016 IEEE Intelligent Vehicles Symposium (IV). 2016. P. 98–103. <https://doi.org/10.1109/IVS.2016.7535371>.
4. Shadrin S. S., Varlamov O. O., Ivanov A. M. Experimental autonomous road vehicle with logical artificial intelligence // Journal of Advanced Transportation. 2017. <https://doi.org/10.1155/2017/2492765>.
5. Дубинкин Д. М. Современное состояние техники и технологий в области автономного управления движением транспортных средств угольных карьеров // Горное оборудование и электромеханика. 2019. № 6. С. 8–15. <https://doi.org/10.26730/1816-4528-2019-6-8-15>.
6. Чичерин И. В., Федосенков Б. А., Сыркин И. С., Садовец В. Ю., Дубинкин Д. М. Концепция управления беспилотными транспортными средствами в условиях открытых горных работ // Известия вузов. Горный журнал. 2020. № 8. С. 109–120. <https://doi.org/10.21440/0536-1028-2020-8-109-120>.
7. Костюк С. Г., Чичерин И. В., Федосенков Б. А., Дубинкин Д. М. Мониторинг динамического состояния автономных тяжелых платформ на карьерных маршрутах горнорудных предприятий // Устойчивое развитие горных территорий. 2020. Т. 12. № 4. С. 600–608. <https://doi.org/10.21177/1998-4502-2020-12-4-600-608>.
8. Mallat S., Zhang Z. Matching pursuit with time-frequency dictionaries // IEEE Transactions on Signal Processing. 1993. Vol. 41. Iss. 12. P. 3397–3415. <https://doi.org/10.1109/78.258082>.
9. Mallat S. A wavelet tour of signal processing. San Diego: Academic Press, 2001. 637 p.
10. Стрейц В. Метод пространства состояний в теории дискретных линейных систем управления / пер. с англ. под ред. Я. З. Цыпкина. М.: Наука, 1985. 296 с.
11. Дорф Р., Бишоп Р. Современные системы управления / пер. с англ. Б. И. Копылова. М.: Лаборатория базовых знаний, 2002. 832 с.
12. Goodwin G. C., Graebe S. F., Salgado M. E. Control system design. New York: Prentice Hall, Pearson Education, Inc., 2001. 944 p.
13. Goswami J. C., Chan A. K. Fundamentals of wavelets: theory, algorithms and applications. Hoboken: John Wiley & Sons, Inc., 2011. 382 p.
14. Добеши И. Десять лекций по вейвлетам. Ижевск: Регулярная и хаотическая динамика, 2001. 464 с.
15. Debnath L. Wavelet transforms and their applications. Boston: Birkhauser, 2002. 565 p.
16. Chicherin I. V., Fedosenkov B. A., Syркин I. S., Sadovets V. Iu., Dubinkin D. M. Using a wavelet medium for computer-aided controlling the movement of unmanned vehicles along quarry routes // Известия вузов. Горный журнал. 2021. № 2. С. 103–112. <https://doi.org/10.21440/0536-1028-2021-2-103-112>.
17. Auger F., Chassande-Mottin E. Quadratic time-frequency analysis I: Cohen's class // Time-frequency analysis: concepts and methods / eds. F. Hlawatsch, F. Auger. London: ISTE, 2008. P. 131–163.
18. Measures, performance assessment, and enhancement TFDs // Time-frequency signal analysis and processing: a comprehensive reference / ed. B. Boashash. New York: Academic Press, 2016. P. 387–452.
19. Fedosenkov D. B., Simikova A. A., Kulakov S. M., Fedosenkov B. A. Cohen's class time-frequency distributions for measurement signals as a means of monitoring technological processes // Steel in Translation. 2019. Vol. 49. Iss. 4. P. 252–256. <https://doi.org/10.3103/S0967091219040065>.
20. Debnath L. Recent development in the Wigner-Ville distribution and time-frequency signal analysis // PINSA. 2002. Vol. 68A. Iss. 1. P. 35–56.
21. Ackermann J. Der Entwurf linearer Regelungssysteme im Zustandsraum // Regelungstechnik und Prozessdatenverarbeitung. 1972. H. 7. S. 297–300.

## References

1. Cheng H. *Autonomous intelligent vehicles: theory, algorithms, and implementation*. Springer-Verlag London; 2011. 154 p.
2. Nonami K., Kartidjo M., Yoon K.-J., Budiyo A. *Autonomous control systems and vehicles: intelligent unmanned systems*. Springer Japan; 2013. 315 p.
3. Naranjo J. E., Clavijo M., Jiménez F., Gómez O., Rivera J. L., Anguita M. Autonomous vehicle for surveillance missions in off-road environment. 2016 IEEE Intelligent Vehicles Symposium (IV). 2016:98-103. <https://doi.org/10.1109/IVS.2016.7535371>.
4. Shadrin S. S., Varlamov O. O., Ivanov A. M. Experimental autonomous road vehicle with logical artificial intelligence. *Journal of Advanced Transportation*. 2017. <https://doi.org/10.1155/2017/2492765>.
5. Dubinkin D. M. Current state of technics and technologies in the field of autonomous control movement vehicles of coal mine caree. *Gornoe oborudovanie i elektromekhanika = Mining Equipment and Electromechanics*. 2019;6:8-15. (In Russ.). <https://doi.org/10.26730/1816-4528-2019-6-8-15>.
6. Chicherin I. V., Fedosenkov B. A., Syркин I. S., Sadovets V. Iu., Dubinkin D. M. The concept of controlling the unmanned vehicles in open pit mining. *Izvestiya vysshikh uchebnykh zavedenii. Gornyi zhurnal = News of the Higher Institutions. Mining Journal*. 2020;8:109-120. (In Russ.). <https://doi.org/10.21440/0536-1028-2020-8-109-120>.
7. Kostyuk S. G., Chicherin I. V., Fedosenkov B. A., Dubinkin D. M. Monitoring of the dynamic state of autonomous heavy platforms on the quarry routes of mining enterprises. *Ustoichivoe razvitie gornykh territorii = Sustainable Development of Mountain Territories*. 2020;12(4):600-608. (In Russ.). <https://doi.org/10.21177/1998-4502-2020-12-4-600-608>.
8. Mallat S., Zhang Z. Matching pursuit with time-frequency dictionaries. *IEEE Transactions on Signal Processing*. 1993;41(12):3397-3415. <https://doi.org/10.1109/78.258082>.



9. Mallat S. *A wavelet tour of signal processing*. San Diego: Academic Press; 2001. 637 p.
10. Strejc V. The state space synthesis in the discrete linear control systems. 1985. 296 p. (Russ. ed.: *Metod prostranstva sostoyanii v teorii diskretnykh lineinykh sistem upravleniya*. Moscow: Nauka; 1985. 296 p.).
11. Dorf R. C., Bishop R. H. *Modern control systems*. 2002. 832 p. (Russ. ed.: *Sovremennyye sistemy upravleniya*. Moscow: Laboratoriya bazovykh znaniy; 2002. 832 p.).
12. Goodwin G. C., Graebe S. F., Salgado M. E. *Control system design*. New York: Prentice Hall, Pearson Education, Inc.; 2001. 944 p.
13. Goswami J. C., Chan A. K. *Fundamentals of wavelets: theory, algorithms and applications*. Hoboken: John Wiley & Sons, Inc.; 2011. 382 p.
14. Daubechies I. *Ten lectures on wavelets*. Izhevsk: Regul'yarnaya i khaoticheskaya dinamika; 2001. 464 p. (In Russ.).
15. Debnath L. *Wavelet transforms and their applications*. Boston: Birkhauser; 2002. 565 p.
16. Chicherin I. V., Fedosenkov B. A., Syrkin I. S., Sadovets V. Iu., Dubinkin D. M. Using a wavelet medium for computer-aided controlling the movement of unmanned vehicles along quarry routes. *Izvestiya vysshikh uchebnykh zavedenii. Gornyi zhurnal = News of the Higher Institutions. Mining Journal*. 2021;2:103-112. <https://doi.org/10.21440/0536-1028-2021-2-103-112>.
17. Auger F., Chassande-Mottin E. Quadratic time-frequency analysis I: Cohen's class. In: Hlawatsch F., Auger F. (eds.). *Time-frequency analysis: concepts and methods*. London: ISTE; 2008. p.131–163.
18. Measures, performance assessment, and enhancement TFDs. In: Boashash B. (ed.). *Time-frequency signal analysis and processing: a comprehensive reference*. New York: Academic Press; 2016. p.387–452.
19. Fedosenkov D. B., Simikova A. A., Kulakov S. M., Fedosenkov B. A. Cohen's class time-frequency distributions for measurement signals as a means of monitoring technological processes. *Steel in Translation*. 2019;49 (4):252-256. <https://doi.org/10.3103/S0967091219040065>.
20. Debnath L. Recent development in the Wigner-Ville distribution and time-frequency signal analysis. *PINSA*. 2002;68A(1):35-56.
21. Ackermann J. Design of linear control systems in the state space. *Tekhnika upravleniya i obrabotka dannykh protsesssa*. 1972;7:297-300. (In German).

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



**Чичерин Иван Владимирович**,  
кандидат технических наук, доцент,  
заведующий кафедрой информационных  
и автоматизированных производственных систем,  
Кузбасский государственный технический университет имени Т. Ф. Горбачева,  
г. Кемерово, Россия,  
[chicivan@yandex.ru](mailto:chicivan@yandex.ru),  
<https://orcid.org/0000-0003-1219-4415>.  
**Ivan V. Chicherin**,  
Cand. Sci. (Eng.), Associate Professor,  
Head of the Department of Information  
and Computer-aided Manufacturing Systems,  
T. F. Gorbachev Kuzbass State Technical University,  
Kemerovo, Russia,  
[chicivan@yandex.ru](mailto:chicivan@yandex.ru),  
<https://orcid.org/0000-0003-1219-4415>.



**Федосенков Борис Андреевич**,  
доктор технических наук, профессор,  
профессор кафедры информационных  
и автоматизированных производственных систем,  
Кузбасский государственный технический университет имени Т. Ф. Горбачева,  
г. Кемерово, Россия,  
[rafwaveletsve@mail.ru](mailto:rafwaveletsve@mail.ru),  
<https://orcid.org/0000-0003-3369-0514>.  
**Boris A. Fedosenkov**,  
Dr. Sc. (Eng.), Professor,  
Professor of the Department of Information  
and Computer-aided Manufacturing Systems,  
T. F. Gorbachev Kuzbass State Technical University,  
Kemerovo, Russia,  
[rafwaveletsve@mail.ru](mailto:rafwaveletsve@mail.ru),  
<https://orcid.org/0000-0003-3369-0514>.

**Вклад авторов / Contribution of the authors**

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

**Конфликт интересов / Conflict of interests**

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

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

**Информация о статье / Information about the article**

Статья поступила в редакцию 02.06.2021; одобрена после рецензирования 08.07.2021; принята к публикации 11.08.2021.

The article was submitted 02.06.2021; approved after reviewing 08.07.2021; accepted for publication 11.08.2021.





Научная статья

УДК 551.78+552.57

<https://doi.org/10.21285/2686-9993-2021-44-3-285-292>



## Находки углей Танхойского поля в донных отложениях Южного Байкала

Олег Михайлович Хлыстов<sup>a</sup>, Андрей Владимирович Вайнер-Кротов<sup>b</sup>,  
Алексей Валерьевич Китаев<sup>c</sup>, Татьяна Владимировна Погодаева<sup>d</sup>

<sup>a,d</sup>Лимнологический институт СО РАН, г. Иркутск, Россия

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

<sup>c</sup>Байкальский государственный заповедник, п. Танхой, Россия

Автор, ответственный за переписку: Хлыстов Олег Михайлович, [khloleg45@yandex.ru](mailto:khloleg45@yandex.ru)

**Резюме.** Целью данного исследования было охарактеризовать первые находки угленосных глин и углей в донных отложениях Южного Байкала и провести их сопоставление с угленосными наземными отложениями Танхойского поля. Сравнительный анализ литологического состава и цвета донных отложений и наземных разрезов, а также содержание органического углерода и палинологический анализ позволили провести их корреляцию. На 900-метровой глубине озера авторами было обнаружено залегание угленосной толщи в *in situ* (st56), после чего проведена их стратиграфическая корреляция с наземной частью угленосной танхойской свиты. Обнаруженные обломки углей в донных отложениях практически по всей линии распространения Танхойского поля, особенно угли в коренном залегании на подводном склоне южной котловины на глубинах озера до 1300 м, доказывают распространение угленосной области танхойской свиты в подводной части озера на протяжении всего склона (5–15 км от берега) и подтверждают площадь распространения Танхойского палеозера на значительной области контура современного Южного Байкала. Находки угленосной толщи на этих, а также разных поддонных глубинах, то есть при различных условиях по давлению и температуре, позволяют предположить, что сами угли и угленосные аргиллиты могут являться объектом генерации вторично-микробного метана. Это необходимо учитывать при поисках скоплений газовых углеводородов и газовых гидратов, а также в оценках цикла метана в озере Байкал.

**Ключевые слова:** угли, метан, неогеновая танхойская свита, Южный Байкал

**Финансирование:** работа выполнена при поддержке гранта РФФИ 19-17-00226 «Реконструкция механизмов формирования проблематичных аутигенных карбонатов в обстановках диагенеза и катагенеза, связанных с генерацией / окислением углеводородов».

**Благодарности:** авторы благодарны доктору географических наук Е. В. Безруковой и П. П. Летуновой за проведение палинологического анализа и определение споро-пыльцевых спектров.

**Для цитирования:** Хлыстов О. М., Вайнер-Кротов А. В., Китаев А. В., Погодаева Т. В. Находки углей Танхойского поля в донных отложениях Южного Байкала // Науки о Земле и недропользование. 2021. Т. 44. № 3. С. 285–292. <https://doi.org/10.21285/2686-9993-2021-44-3-285-292>.

Original article

## Occurrence of Tankhoy field coals in South Baikal bottom sediments

Oleg M. Khlystov<sup>a</sup>, Andrey V. Vainer-Krotov<sup>b</sup>, Aleksey V. Kitaev<sup>c</sup>, Tatiana V. Pogodaeva<sup>d</sup>

<sup>a,d</sup>Limnological Institute, Siberian Branch of the Russian Academy of Sciences, Irkutsk, Russia

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

<sup>c</sup>Baikal State Nature Reserve, Tankhoy, Russia

Corresponding author: Oleg M. Khlystov, [khloleg45@yandex.ru](mailto:khloleg45@yandex.ru)

**Abstract.** The purpose of the study is to describe the first finds of coal-bearing clays and coals in the bottom sediments of the southern basin of Lake Baikal and compare them with terrestrial coal-bearing deposits of the Tankhoy field. Comparative analysis of the lithological composition and colour of bottom sediments and terrestrial sections, as well as the concentration of organic carbon and conducted palynological analysis allowed their correlation. At the lake's depth of 900 m the



authors discovered a coal-bearing strata in situ (st 56), which later was stratigraphically correlated with the terrestrial coal-bearing part of the Tankhoy suite. The fragments of coal found in bottom sediments basically along the entire Tankhoy field, especially bedrock coals on the underwater slope in South Baikal up to 1300 m deep prove the distribution of the coal-bearing part of the Tankhoy suite in the sublacustrine part of the lake throughout the entire slope (from 5 to 10 km offshore) and confirm the distribution area of the Tankhoy paleolake over a significant area of the contour of modern southern basin of Lake Baikal. The finds of coal-bearing strata on these and other various sub-bottom depths, i.e. under various pressure and temperature conditions, suggest that coals themselves and coal-bearing mudstones may be a generation facility of secondary microbial methane. This should be taken into account when searching for gas hydrocarbon and gas hydrate accumulations as well as assessing methane cycles in Lake Baikal.

**Keywords:** coals, methane, Neogene Tankhoy suite, Southern Baikal

**Funding:** this work was supported by the Russian Science Foundation grant 19-17-00226 "Reconstruction of formation mechanisms of problematic authigenic carbonates in diagenesis and catagenesis settings associated with hydrocarbon generation / oxidation".

**Acknowledgements:** the authors thank Doctor of Geographical Sciences E. V. Bezrukova and P. P. Letunova for carrying out of the palynological analysis and determination of the spore/pollen spectra.

**For citation:** Khlystov O. M., Vainer-Krotov A. V., Kitaev A. V., Pogodaeva T. V. Occurrence of Tankhoy field coals in South Baikal bottom sediments. *Nauki o Zemle i nedropol'zovanie = Earth sciences and subsoil use*. 2021;44(3):285-292. (In Russ.). <https://doi.org/10.21285/2686-9993-2021-44-3-285-292>.

## Введение

Осадочные угленосные отложения Танхойского третичного поля прослеживаются на южном берегу Байкала вдоль подножия хребта Хамар-Дабан в междуречье Шанхаихи и Мысовки непрерывной полосой шириной до 8 км [1]. В последние годы в результате дополнительных биостратиграфических и литолого-фациальных исследований были уточнены строение и история развития этих отложений посредством детализации возрастных границ перестройки рельефа Прибайкалья от олигоцена до плиоцена [2–4].

Вдоль береговой полосы Южного Байкала известно несколько естественных обнажений угленосных толщ видимой мощностью в десятки метров. Они также подсечены скважинами до глубин 400 и более метров. Мощности угольных пластов колеблются от 0,6 до 7 м [1, 3].

Отложения достаточно хорошо изучены с биостратиграфической точки зрения. В работе И. М. Машук и Н. И. Акулова [2] подробно охарактеризован один из опорных разрезов танхойской свиты по реке Осиновке – разрез Шахтерская горка, где в естественных обнажениях описаны слои угля мощностью до 2,5 м. Слои угля наклонены в сторону озера и перекрыты «голубыми» глинами. Цвет последних на контакте с углями меняется и переходит к черно-коричневым оттенкам. Угли в основном представлены витринитом. По палинологическим данным установлено,

что возраст танхойской свиты, содержащей эти угольные пласты, олигоцен-раннемиоценовый. Формирование свиты происходило в древнем Танхойском бассейне, в пределах которого преобладал озерно-болотный ландшафт. На возвышенных предгорных равнинах произрастали хвойно-широколиственные леса, состоящие из дуба (*Quercus*), бука (*Fagus*), вяза (*Ulmus*), падуба (*Ilex*). Примесью в этих лесах являлись сосна (*Pinus*), пихта (*Abies*), ель (*Picea*), кедр (*Cedrus*) и тсуга (*Tsuga*).

Другой опорный разрез, вскрытый при строительстве дороги в районе реки Мишихи, подробно описан в работе А. Аль-Хамуда с соавторами [4, 5]. В разрезе выделено шесть пачек, и определено время их формирования: 1) полифациальная, охристая (верхний эоцен, пыльца широколиственных пород); 2) «синих» глин (верхний олигоцен, пыльца широколиственных пород); 3) алевроитовая с прослоями бурого угля (нижний миоцен, пыльца темнохвойных и широколиственных пород); 4) песчано-алевритовая с фрагментами «синих» глин (средний – верхний миоцен, пыльца светлохвойных сосново-лиственничных и темнохвойных лесов с хорошо развитым травянокустарниковым подлеском); 5) песчаная; 6) валунно-галечная (квартер, споры и пыльца растительности, близкой к современной). Третья пачка отнесена к танхойской свите, четвертая – к осиновской.

Общая мощность неогеновых отложений танхойской свиты на суше достигает несколь-



ких сотен метров. Предполагается также подводное продолжение отложений, которое оценивается в подводной части озера до 1,5 км [6, 7]. Однако до сих пор вещественных доказательств распространения танхойской свиты под водами озера на восточном склоне и абиссальной равнине Южного Байкала не было. Исключение составляет визуальное наблюдение с глубоководных аппаратов «Мир» углей в склоне подводной возвышенности Муринская банка на глубине 850 м [8].

Известно, что на дне озера Байкал присутствуют скопления углеводородов в виде нефти, газа и газовых гидратов [9–11]. Чаще всего это метан. В газовых гидратах он отличается аномальным разнообразием изотопного состава углерода (от -20 до -70 ‰), что ставит вопрос об источниках или объектах его генерации [12–14]. Если для средней котловины озера наличие на дне природных нефтепроявлений может дать ответ на этот вопрос, то для Южного Байкала вопрос остается открытым. Недавно в одном из грязевых вулканов южного Байкала (Кедр) был обнаружен вторично-микробный метан. Авторы предполагают, что его образование связано с присутствием в нижележащем разрезе отложений угленосной неогеновой танхойской свиты, которая и может быть одним из генераторов такого аномального метана в газовых гидратах. Подобное явление, при котором угли могут быть источником такого метана, обнаружено в одном из гидратоносных районов возвышенности Элберт (Аляска, США) [14, 15]. Тем не менее вещественных доказательств распространения танхойской свиты под водами Южного Байкала не было, как и доказательств наличия угленосной толщи на поддонных глубинах, где по температурному режиму (50–70 °C) может генерироваться подобный метан [16]. Для Южного Байкала это глубины от сотен метров до двух километров ниже дна озера.

Таким образом, целью данной работы стал поиск вещественных доказательств распространения угленосной части танхойской свиты в подводной части озера посредством характеристики первых находок угленосных глин и углей в донных отложениях Южного Байкала.

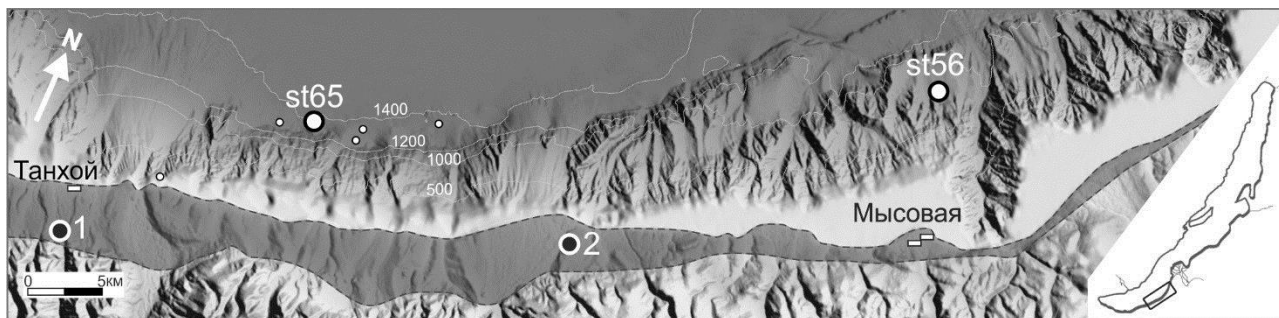
## Материалы и методы исследования

Объектом исследования являлось пространственное распределение находок угля танхойской свиты на различных глубинах в первых метрах донных отложений южного склона одноименной котловины озера Байкал. Методика исследования заключалась в анализе цифровой модели рельефа дна, построенной по высокоразрешающим батиметрическим данным и данным дистанционного зондирования суши, поиске положительных форм и их геологическом опробовании гравитационными трубами диаметром 127 мм и длиной до 5 м (аналог однорейсового ударно-канатного бурения). Работы проводились на участке подводного склона и абиссальной равнины на траверзах между станциями Танхой и Мысовая. Всего было отобрано семь кернов, в которых встречены образцы углей (рисунок).

Палинологический анализ и определение содержания органического углерода производились по стандартным методикам, приведенным в публикациях [17, 18]. Образцы проходили предварительную пробоподготовку. Для палинологического анализа определялся количественный и качественный состав споро-пыльцевых спектров на микроскопе. Для содержания органического углерода использовался метод каталитического высокотемпературного окисления образца при 950 °C с последующим определением углекислого газа с помощью инфракрасного детектора на высокотемпературном анализаторе углерода Vario TOC Cube.

## Результаты исследования и их обсуждение

Первоначально геологическое опробование велось с целью открытия новых гидратоносных подводных структур разного размера (гидратных холмов или грязевых вулканов). Но в ряде кернов были вскрыты слои с угловатыми обломками угля размерами до нескольких сантиметров в поперечном сечении. Угли были темно-серые, черные матовые с тончайшими пропластками блестящего угля. Обломки углей были встречены в кернах как в турбидитовых слоях на склоне и границе



### Цифровая модель рельефа части Южного Байкала

Серой заливкой показана площадь распространения угленосных отложений на суше;  
черные круги с белой окантовкой – места обнажений углей танхойской свиты на суше:

1 – Шахтерская горка, 2 – Мишиха;

белые круги с черной окантовкой – керны с обломками угля на склоне;

st65 и st56 – керны на подводных возвышенностях

### Digital elevation model of a part in the southern basin of Lake Baikal

Grey tint shows the distribution area of coal-bearing deposits on land;

black circles with white edging indicate sites of Tankhoy suite coal outcrops on land:

1 – Shakhtyorskaya gorka, 2 – Mishikha;

white circles with black edging indicate cores with coal fragments on slope;

st65 and st56 are the cores on sublacustrine elevations

с абиссальной равниной (глубина до 1400 м) на небольших буграх высотой менее 5 м, так и на подводных возвышенностях высотой более 10 м на глубинах 1300 м (st65) и 900 м (st56). В керне st65 они лежали в перемешанном слое, состоящем из мелких (от 1 до 5 мм) обломков плотной «голубой» глины в матрице из вязкой серой глины с примесью песка. Мощность слоя составила 5 см. Этот слой был перекрыт слоистыми серыми глинами и оливково-серым диатомовым илом. Возможно, этот слой является дистальной частью грязевулканического потока. В керне st56 был вскрыт разрез, в котором на слое угля залежали прослои углистых и алевроитистых глин темно-коричневого, темно-серого цветов. Выше них располагались «голубые» глины, которые перекрывались серыми алевроитистыми глинами и метровым слоем оливково-серого диатомового ила. Такое положение и сочетание углей и глин говорит об их залегании *in situ*. Подобное чередование отмечается и нами, и другими исследователями на обнажении Шахтерская горка [2]. Трубка пробоборника не смогла пробить весь слой угля, но, судя по другим кернам этого района, плотные «голубые» глины распространены по всей возвышенности и под углями стоит также ожидать наличие подобных глин.

В темно-коричневых глинах на обнажении Шахтерская горка и керне st56 определено

содержание органического углерода. Оно составило 5,91 и 4,01 % соответственно. Стоит отметить, что в обычных глинах Южного Байкала этот показатель колеблется в интервале 0,33–0,53 % [19].

Дополнительно для стратиграфической привязки угленосных аргиллитов и «голубых» глин керна st56 был выполнен палинологический анализ, который показал, что область осадконакопления представляла собой болотисто-озерный ландшафт, где присутствовали березово-еловые редколесья, ольховниковые группировки, сосна и кедр сибирский. Обнаружены зерна пыльцы теплолюбивых древесных растений: тсуги (*Tsuga*), липы (*Tilia*), дуба (*Quercus*), ильмы (*Ulmus*).

Таким образом, литологический состав и присутствие внешне схожих углей, цвет глин, содержание органического углерода, близкий состав пыльцы сухопутных и подводных обнажений является косвенным доказательством одновозрастности наземных разрезов и нижней части керна st56, эта часть может быть отнесена к неогеновой угленосной части отложений Танхойского поля (танхойская и осиновская свиты).

О распространении угленосных толщ Танхойского поля подробно говорилось во введении к работам [1–4]. В последнее время возможное наличие углей под толщей донных отложений стало объектом исследования для



понимания их участия в генезисе вторично-микробного метана и углеводородогенерации в целом на Южном Байкале [13]. Однако находок коренного залегания глин и углей танхойской свиты в глубоководной части озера (кроме склона Муринской банки (850 м)) обнаружено не было. Отобранные нами обломки углей в донных отложениях на траверсе от станции Танхой до Мысовой (практически по всей линии распространения Танхойского поля), а особенно угли в коренном залегании на подводном склоне южной котловины (на глубинах до 1300 м ниже уровня озера), доказывают распространение угленосной части Танхойского поля (отложения танхойской свиты) в подводной части озера на протяжении всего склона (5–15 км от берега) и подтверждают площадь распространения Танхойского палеоозера как значительную часть современного Южного Байкала [20].

Столь разнообразное расположение находок угленосной толщи (или ее следов) по глубине озера (до 1300 м) и поддонной глубине (1 м – ~1 км) позволяет предположить, что сами угли и угленосные аргиллиты могут находиться в различных условиях по давлению и температуре и являться субстратом для генерации дополнительных газообразных угле-

водородов, что подтверждено находками вторично-микробного метана на одном из грязевых вулканов Южного Байкала – вулкане Кедр [13]. Сами же угленосные толщи (угли и «голубые» глины) могут попадать в зону корней грязевого вулканизма в Южном Байкале и быть частью грязевулканической брекчии, выброшенной на поверхность дна озера.

### Заключение

По литологическим, геохимическим, палинологическим данным и общему строению вскрытый подводный разрез с угольным пластом относится к верхней части танхойской свиты и является неглубокозалегающим коренным выходом данной свиты, перекрытым метровым голоценовым слоем диатомового ила. Столь неглубокое залегание угленосных древних отложений под дном наряду с глубинным их распространением важно для поиска углей в грязевулканической брекчии грязевых вулканов этой части озера, их необходимо учитывать и при поисках скоплений метана и газовых гидратов. Угли и угленосные аргиллиты могут являться объектом генерации вторично-микробного метана, что также необходимо учитывать в оценках цикла метана в озере Байкал.

### Список источников

1. Литология третичных отложений юго-западной части Байкальской рифтовой зоны / отв. ред. Н. А. Логачев. М.: Наука, 1972. 120 с.
2. Машук И. М., Акулов Н. И. Олигоценные отложения байкальской рифтовой впадины // Геология и геофизика. 2012. Т. 53. № 4. С. 461–475.
3. Рассказов С. В., Лямина Н. А., Лузина И. В., Черняева Г. П., Чувашова И. С., Усольцева М. В. Отложения Танхойского третичного поля, Южно-Байкальская впадина: стратиграфия, корреляции и структурные перестройки в Байкальском регионе // Геодинамика и тектонофизика. 2014. Т. 5. № 4. С. 993–1032. <https://doi.org/10.5800/GT-2014-5-4-0165>.
4. Аль Хамуд А., Рассказов С. В., Чувашова И. С., Трегуб Т. Ф., Волков М. А., Кулагина Н. В. [и др.]. Временные вариации состава кайнозойских отложений на Танхойской тектонической ступени Южного Байкала // Известия Иркутского государственного университета. Серия «Наука о Земле». 2019. Т. 30. С. 108–129. <https://doi.org/10.26516/2073-3402.2019.30.108>.
5. Аль Хамуд А., Рассказов С. В., Чувашова И. С., Трегуб Т. Ф., Рубцова М. Н., Коломиец В. Л. [и др.]. Опрокинутая эоцен-нижнеплиоценовая аллювиальная толща на южном берегу оз. Байкал и ее неотектоническое значение // Геодинамика и тектонофизика. 2021. Т. 12. № 1. С. 139–156. <https://doi.org/10.5800/GT-2021-12-1-0518>.
6. Hutchinson D. R., Golmshtok A. Y., Zonenshain L. P., Moore T. C., Scholz C. A., Klitgord K. D. Depositional and tectonic framework of the rift basins of Lake Baikal from multichannel seismic data // Geology. 1992. Vol. 20. Iss. 7. P. 589–592. [https://doi.org/10.1130/0091-7613\(1992\)020<0589:DATFOT>2.3.CO;2](https://doi.org/10.1130/0091-7613(1992)020<0589:DATFOT>2.3.CO;2).
7. Мац В. Д., Уфимцев Г. Ф., Мандельбаум М. М., Алакшин А. М., Поспеев А. В., Шимараев М. Н. [и др.]. Кайнозой Байкальской рифтовой впадины: строение и геологическая история. Новосибирск: Гео, 2001. 249 с.
8. Хлыстов О. М., Кононов Е. Е., Минами Х., Казаков А. В., Хабуев А. В., Губин Н. А. [и др.]. О рельефе и генезисе подводной возвышенности Муринская банка (Южный Байкал) // География и природные ресурсы. 2016. № 5. С. 109–116. [https://doi.org/10.21782/GIPR0206-1619-2016-5\(109-116\)](https://doi.org/10.21782/GIPR0206-1619-2016-5(109-116)).
9. Khlystov O. M., De Batist M., Shoji H., Hachikubo A., Nishio S., Naudts N., et al. Gas hydrate of Lake Baikal: discovery and varieties // Journal of Asian Earth Sciences. 2013. Vol. 62. P. 162–166. <https://doi.org/10.1016/j.jseaes.2012.03.009>.





10. Конторович А. Э., Каширцев В. А., Москвин В. И., Бурштейн Л. М., Земская Т. И., Костырева Е. А. [и др.]. Нефтегазоносность отложений озера Байкал // Геология и геофизика. 2007. Т. 48. № 12. С. 1346–1356.

11. Khlystov O. M., Khabuev A. V., Minami H., Hachikubo A., Krylov A. A. Gas hydrates in Lake Baikal // *Limnology and Freshwater Biology*. 2018. Vol. 1. P. 66–70. <https://doi.org/10.31951/2658-3518-2018-A-1-66>.

12. Калмычков Г. В., Покровский Б. Г., Хачикубо А., Хлыстов О. М. Геохимические характеристики метана из осадков подводной возвышенности Посольская банка (озеро Байкал) // Литология и полезные ископаемые. 2017. № 2. С. 121–129. <https://doi.org/10.7868/S0024497X17020057>.

13. Hachikubo A., Minami H., Yamashita S., Khabuev A., Krylov A., Kalmychkov G. [et al.]. Characteristics of hydrate-bound gas retrieved at the Kedr mud volcano (southern Lake Baikal) // *Scientific Reports*. 2020. Vol. 10. P. 14747. <https://doi.org/10.1038/s41598-020-71410-2>.

14. Калмычков Г. В., Егоров А. В., Хачикубо А., Хлыстов О. М. Углеводородные газы подводного нефтегазового проявления Горевой утес (оз. Байкал, Россия) // Геология и геофизика. 2019. Т. 60. № 10. С. 1488–1495. <https://doi.org/10.15372/GiG2019110>.

15. Lorenson T. D., Collett T. S., Hunter R. B. Gas geochemistry of the Mount Elbert Gas Hydrate Stratigraphic Test Well, Alaska North Slope: implications for gas hydrate

exploration in the Arctic // *Marine and Petroleum Geology*. 2011. Vol. 28. Iss. 2. P. 343–360. <https://doi.org/10.1016/j.marpetgeo.2010.02.007>.

16. Milkov A. V. Worldwide distribution and significance of secondary microbial methane formed during petroleum biodegradation in conventional reservoirs // *Organic Geochemistry*. 2011. Vol. 42. Iss. 2. P. 184–207. <https://doi.org/10.1016/j.orggeochem.2010.12.003>.

17. Безрукова Е. В., Тарасов П. Е., Кулагина Н. В., Абзаева А. А., Летунова П. П., Кострова С. С. Палинологическое исследование донных отложений озера Котокель (район озера Байкал) // Геология и геофизика. 2011. Т. 52. № 4. С. 586–595.

18. Погодаева Т. В., Ходжер Т. В., Жученко Н. А., Григорьев М. Н., Панов В. С., Максимов Г. Т. Поступление органического вещества в залив Буор-Хая (море Лаптевых) // Геология и геофизика. 2017. Т. 58. № 5. С. 739–752. <https://doi.org/10.15372/GiG20170505>.

19. Выхристюк Л. А. Органическое вещество донных осадков Байкала. Новосибирск: Наука, 1980. 80 с.

20. Хлыстов О. М., Кононов Е. Е., Минами Х., Казаков А. В., Хабуев А. В., Губин Н. А. [и др.]. Новые данные о рельефе подводного южного склона Южно-Байкальской котловины // География и природные ресурсы. 2018. № 1. С. 59–65. [https://doi.org/10.21782/GIPR0206-1619-2018-1\(59-65\)](https://doi.org/10.21782/GIPR0206-1619-2018-1(59-65)).

## References

1. Logachev N. A. *Lithology of Tertiary sediments in the south-western part of the Baikal rift zone*. Moscow: Nauka; 1972. 120 p. (In Russ).

2. Mashchuk I. M., Akulov N. I. Oligocene deposits of the Baikal Rift Valley. *Geologiya i geofizika*. 2012;53(4):461–475. (In Russ).

3. Rasskazov S. V., Lyamina N. A., Luzina I. V., Chernyaeva G. P., Chuvashova I. S., Usoltseva M. V. Sediments in the tertiary Tankhoi field, South Baikal basin: stratigraphy, correlation and structural transformations in the Baikal region. *Geodinamika i tektonofizika = Geodynamics & Tectonophysics*. 2014;5(4):993–1032. (In Russ.). <https://doi.org/10.5800/GT-2014-5-4-0165>.

4. Al Hamoud A., Rasskazov S. V., Chuvashova I. S., Tregub T. F., Volkov M. An., Kulagina N. V., et al. Temporal compositional variations of Cenozoic sediments on the Tankhoi tectonic step, the Southern Baikal. *Izvestiya Irkutskogo gosudarstvennogo universiteta. Seriya "Nauki o Zemle" = Bulletin of Irkutsk State University. Series "Earth Sciences"*. 2019;30:108–129. (In Russ.). <https://doi.org/10.26516/2073-3402.2019.30.108>.

5. Al Hamoud A., Rasskazov S. V., Chuvashova I. S., Tregub T. F., Rubtsova M. N., Kolomiyets V. L., et al. Overturned Eocene – Lower Pliocene alluvial stratum on the southern coast of Lake Baikal and its neotectonic significance. *Geodinamika i tektonofizika = Geodynamics & Tectonophysics*. 2021;12(1):139–156. (In Russ.). <https://doi.org/10.5800/GT-2021-12-1-0518>.

6. Hutchinson D. R., Golmshtok A. Y., Zonenshain L. P., Moore T. C., Scholz C. A., Klitgord K. D. Depositional

and tectonic framework of the rift basins of Lake Baikal from multichannel seismic data. *Geology*. 1992;20(7):589–592. (In Russ.). [https://doi.org/10.1130/0091-7613\(1992\)020<0589:DATFOT>2.3.CO;2](https://doi.org/10.1130/0091-7613(1992)020<0589:DATFOT>2.3.CO;2).

7. Mats V. D., Ufimtsev G. F., Mandel'baum M. M., Alakshin A. M., Pospeev A. V., Shimaraev M. N., et al. *The Baikal basin in the Cenozoic: structure and geologic history*. Novosibirsk: Geo; 2001. 249 p. (In Russ).

8. Khlystov O. M., Kononov E. E., Minami H., Kazakov A. V., Khabuev A. V., Gubin N. A., et al. Topography and genesis of the Murinskaya Banka underwater upland (Southern Baikal). *Geografiya i prirodnye resursy*. 2016;5:109–116. (In Russ.). [https://doi.org/10.21782/GIPR0206-1619-2016-5\(109-116\)](https://doi.org/10.21782/GIPR0206-1619-2016-5(109-116)).

9. Khlystov O. M., De Batist M., Shoji H., Hachikubo A., Nishio S., Naudts N., et al. Gas hydrate of Lake Baikal: discovery and varieties. *Journal of Asian Earth Sciences*. 2013; 62:162–166. <https://doi.org/10.1016/j.jseaes.2012.03.009>.

10. Kontorovich A. E., Kashirtsev V. A., Moskvina V. I., Burshtein L. M., Zemskaya T. I., Kostyreva E. A., et al. Petroleum potential of Baikal deposits. *Geologiya i geofizika*. 2007;48(12):1346–1356. (In Russ).

11. Khlystov O. M., Khabuev A. V., Minami H., Hachikubo A., Krylov A. A. Gas hydrates in Lake Baikal. *Limnology and Freshwater Biology*. 2018;1:66–70. <https://doi.org/10.31951/2658-3518-2018-A-1-66>.

12. Kalmychkov G. V., Pokrovsky B. G., Hachikubo A., Khlystov O. M. Geochemical characteristics of methane from sediments of the underwater high Posolskaya Bank (Lake Baikal). *Litologiya i poleznye iskopaemye*.



2017;2:121–129. (In Russ). <https://doi.org/10.7868/S0024497X17020057>.

13. Hachikubo A., Minami H., Yamashita S., Khabuev A., Krylov A., Kalmychkov G., et al. Characteristics of hydrate-bound gas retrieved at the Kedr mud volcano (southern Lake Baikal). *Scientific Reports*. 2020;10:14747. <https://doi.org/10.1038/s41598-020-71410-2>.

14. Kalmychkov G. V., Egorov A. V., Hachikubo A., Khlystov O. M. Hydrocarbon gases of the Gorevoi Utes underwater oil-gas seep (Lake Baikal, Russia). *Geologiya i geofizika*. 2019;60(10):1488-1495. (In Russ). <https://doi.org/10.15372/GiG2019110>.

15. Lorenson T. D., Collett T. S., Hunter R. B. Gas geochemistry of the Mount Elbert Gas Hydrate Stratigraphic Test Well, Alaska North Slope: implications for gas hydrate exploration in the Arctic. *Marine and Petroleum Geology*. 2011;28(2):343-360. <https://doi.org/10.1016/j.marpetgeo.2010.02.007>.

16. Milkov A. V. Worldwide distribution and significance of secondary microbial methane formed during petroleum biodegradation in conventional reservoirs. *Organic*

*Geochemistry*. 2011;42(2):184-207. <https://doi.org/10.1016/j.orggeochem.2010.12.003>.

17. Bezrukova E. V., Tarasov P. E., Kulagina N. V., Abzaeva A. A., Letunova P. P., Kostrova S. S. Palynological study of Lake Kotokel' bottom sediments (Lake Baikal region). *Geologiya i geofizika*. 2011;52(4):586-595. (In Russ).

18. Pogodaeva T. V., Khodzher T. V., Zhuchenko N. A., Grigoriev M. N., Panov V. S., Maksimov G. T. Input of organic matter to the Buor-Khaya Gulf (Laptev Sea). *Geologiya i geofizika*. 2017;58(5):739-752. (In Russ). <https://doi.org/10.15372/GiG20170505>.

19. Vykhristyuk L. A. *Organic matter of Lake Baikal bottom sediments*. Novosibirsk: Nauka; 1980. 80 p. (In Russ.).

20. Khlystov O. M., Kononov E. E., Minami H., Kazakov A. V., Khabuev A. V., Gubin N. A., et al. New evidence on the relief of the southern underwater slope in the South Baikal basin. *Geografiya i prirodnye resursy*. 2018;1:59-65. (In Russ.). [https://doi.org/10.21782/GIPR0206-1619-2018-1\(59-65\)](https://doi.org/10.21782/GIPR0206-1619-2018-1(59-65)).

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



**Хлыстов Олег Михайлович,**

заведующий Лабораторией геологии озера Байкал,  
старший научный сотрудник,  
Лимнологический институт СО РАН,  
г. Иркутск, Россия,  
khloleg45@yandex.ru,  
<https://orcid.org/0000-0002-6128-708x>.

**Oleg M. Khlystov,**

Head of the Laboratory of Lake Baikal Geology,  
Senior Researcher,  
Limnological Institute, Siberian Branch of the Russian Academy of Sciences,  
Irkutsk, Russia,  
khloleg45@yandex.ru,  
<https://orcid.org/0000-0002-6128-708x>.



**Вайнер-Кротов Андрей Владимирович,**

старший преподаватель кафедры физической культуры,  
Иркутский национальный исследовательский технический университет,  
г. Иркутск, Россия,  
vainerkrotov@mail.ru.

**Andrey V. Vainer-Krotov,**

Senior Lecturer of the Department of Physical Education,  
Irkutsk National Research Technical University,  
Irkutsk, Russia,  
vainerkrotov@mail.ru.



**Китаев Алексей Валерьевич,**

начальник научного отдела,  
Байкальский государственный заповедник,  
п. Танхой, Россия,  
kitav1986@mail.ru.

**Aleksey V. Kitaev,**

Head of the Science Division,  
Baikal State Nature Reserve,  
Tankhoy, Russia,  
kitav1986@mail.ru.



**Погодаева Татьяна Владимировна,**  
кандидат геолого-минералогических наук,  
старший научный сотрудник Лаборатории гидрохимии и химии атмосферы,  
Лимнологический институт СО РАН,  
г. Иркутск, Россия,  
tatyana@lin.irk.ru,  
<https://orcid.org/0000-0002-4596-671X>.

**Tatiana V. Pogodaeva,**  
Cand. Sci. (Geol. & Mineral.),  
Senior Researcher of the Laboratory of Hydrochemistry and Atmospheric Chemistry,  
Limnological Institute, Siberian Branch of the Russian Academy of Sciences,  
Irkutsk, Russia,  
tatyana@lin.irk.ru,  
<https://orcid.org/0000-0002-4596-671X>.

#### **Вклад авторов / Contribution of the authors**

Хлыстов О. М., Вайнер-Кротов А. В., Китаев А. В. собрали полевой материал, совместно с Погодаевой Т. В. проанализировали его и подготовили публикацию.

Khlystov O. M., Vainer-Krotov A. V., Kitaev A. V. collected field material and together with Pogodaeva T. V. analyzed it and prepared the publication.

#### **Конфликт интересов / Conflict of interests**

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

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

#### **Информация о статье / Information about the article**

Статья поступила в редакцию 13.04.2021; одобрена после рецензирования 15.07.2021; принята к публикации 19.08.2021.

The article was submitted 13.04.2021; approved after reviewing 15.07.2021; accepted for publication 19.08.2021.



Научная статья

УДК 556.334

<https://doi.org/10.21285/2686-9993-2021-44-3-293-300>



## Газодинамическая характеристика вмещающих пород глубоких горизонтов шахтного поля трубки «Мир»

Светлана Александровна Янникова<sup>a</sup>, Алексей Михайлович Янников<sup>b</sup>

<sup>a,b</sup>Институт «Якутнипроалмаз» АК «АЛРОСА» (ПАО), г. Мирный, Россия

Автор, ответственный за переписку: Янникова Светлана Александровна, yannikovasa@yandex.ru

**Резюме.** Целью данного исследования являлось изучение газодинамических характеристик глубоких горизонтов шахтного поля трубки «Мир» для обеспечения промышленной безопасности при строительстве и возобновлении добычи на месторождении. В основу работы легли проведенные при бурении поинтервальные натурные эксперименты, а также последующее изучение керна. Изучение основных газодинамических параметров глубоких горизонтов месторождения выполнено при бурении опытных скважин, по которым произведено поинтервальное определение расходов пластовых газов с применением пакерных установок и комплексного оборудования для исследования, отбор проб газов для определения их химического состава, также был выполнен газовый каротаж. В результате проведенных работ была сформирована газодинамическая характеристика толбачанской свиты в пределах шахтного поля трубки «Мир». Выделены интервалы коллекторов, определен характер их флюидонасыщения. Уточнен химический состав пластовых газов, изучен характер и интенсивность газовыделения – как при бурении, так и при проведении поинтервальных испытаний. Итогом проведенных исследований явилось выделение зон, отличных по флюидопроявлениям, а также сопоставление рассматриваемого месторождения с изученным ранее месторождением трубка «Интернациональная». Итоги проведенных работ будут являться основой для выполнения проектных прогнозных расчетов, а также принятия основных проектных решений при строительстве капитальных горных выработок, особенно в части опережающей дегазации горного массива. Учет выделенных в пределах толбачанской свиты зон, отличных по характеру флюидонасыщения, позволит учесть и минимизировать возможные негативные факторы.

**Ключевые слова:** Сибирская платформа, Мирнинское кимберлитовое поле, кимберлитовая трубка «Мир», толбачанская свита, малодобитные трещиноватые коллекторы

**Для цитирования:** Янникова С. А., Янников А. М. Газодинамическая характеристика вмещающих пород глубоких горизонтов шахтного поля трубки «Мир» // Науки о Земле и недропользование. 2021. Т. 44. № 3. С. 293–300. <https://doi.org/10.21285/2686-9993-2021-44-3-293-300>.

Original article

## Gas-dynamic characteristics of the host rocks of Mir pipe mine field deep horizons

Svetlana A. Yannikova<sup>a</sup>, Aleksey M. Yannikov<sup>b</sup>

<sup>a,b</sup>Yakutnioproalmaz Institute, PJSC ALROSA, Mirny, Russia

Corresponding author: Svetlana A. Yannikova, yannikovasa@yandex.ru

**Abstract.** The purpose of the research is to study the gas-dynamic characteristics of deep horizons of the Mir pipe mine field to ensure industrial safety under construction and production resumption at the field. The study is based on the interval field experiments carried out during drilling and subsequent study of the core. The main gas-dynamic parameters of the deep horizons of the field were studied during the drilling of pilot wells that enabled to perform interval determination of the flow rates of formation gases using packers and complex research equipment, gas sampling for the determination of chemical composition of gases, and gas logging. The conducted works resulted in the formulation of the gas-dynamic characteristic of the Tolbachan formation within the mine field of the Mir pipe. Reservoir intervals were identified and the nature of their fluid saturation was determined. The chemical composition of formation gases was clarified and gas release nature and intensity were studied both under drilling and interval testing. The result of the research carried out was identification of zones with different fluid manifestations, as well as comparison of the field under investigation with the previously studied International pipe. The results of the conducted research works will form the basis for performing design forecast calcula-



tions, as well as for making the main design decisions under construction of capital mine workings, especially in terms of advanced degassing of the mountain range. Consideration of the zones identified within the Tolbachan formation, which feature different nature of fluid saturation, will allow to take into account and minimize possible adverse factors.

**Keywords:** Siberian platform, Mirny kimberlite field, Mir kimberlite pipe, Tolbachan formation, small debit fractured reservoirs

**For citation:** Yannikova S. A., Yannikov A. M. Gas-dynamic characteristics of the host rocks of Mir pipe mine field deep horizons. *Nauki o Zemle i nedropol'zovanie = Earth sciences and subsoil use*. 2021;44(3):293-300. (In Russ.). <https://doi.org/10.21285/2686-9993-2021-44-3-293-300>.

## Введение

Кимберлитовая трубка «Мир» вскрыта одним из крупнейших в мире алмазных карьеров. В результате затопления действующего подземного рудника месторождения из-за негативных гидрогеомеханических процессов дальнейшая отработка месторождения связана с возобновлением добычных работ, в том числе и на глубинах 1000–1400 м от дневной поверхности.

При переходе подземных горных работ на большие глубины возникают проблемы освоения месторождений, связанные с повышением горного давления, газо- и гидродинамическими явлениями, что обуславливает развитие геотехнологий, учитывающих возникновение опасных зон разрушений массива [1–3]. В связи с этим первостепенной задачей при строительстве и возобновлении добычи становится обеспечение промышленной безопасности работ. Важной составляющей данной задачи является изучение газодинамических условий месторождения с детальностью, обеспечивающей выполнение расчетов погоризонтных притоков пластовых газов.

Согласно проведенным ранее исследованиям, главным объектом, осложняющим добычные работы на глубинах 1000–1400 м от дневной поверхности, для трубки «Интернациональная» – месторождения, находящегося с изучаемым месторождением в рамках одного кимберлитового поля, является толбачанский водоносный комплекс, приуроченный к одноименной свите [4]. Имеющаяся в настоящее время информация о газодинамических условиях в интервале толбачанской свиты в пределах шахтного поля трубки «Мир» недостаточна. В связи с этим целью данной работы выбрана газодинамическая характеристика толбачанской свиты в пределах околотрубочного пространства трубки «Мир» – коренного месторождения алмазов, относящегося к мирнинскому кимберлитовому полю,

входящему в якутскую алмазоносную провинцию [4]. Освоение месторождения осложнено суровыми природно-климатическими условиями и специфическими факторами: большой глубиной карьера, газовостью, водоприитоками [5, 6].

Изучаемое месторождение является главным в одноименном кимберлитовом поле и характеризуется уникальными параметрами алмазоносности и ценности добываемого сырья. Его открытие послужило точкой отсчета в становлении алмазодобывающей промышленности в целом. Дальнейшая отработка данного месторождения связана с возобновлением добычи подземным способом [7–12].

## Материалы и методы исследования

В процессе сопровождения бурения в период с 2019 по 2020 гг. было выяснено, что глубина залегания кровли от дневной поверхности объекта изучения – толбачанской свиты – в пределах шахтного поля трубки «Мир» составляет 1030 м (абсолютная отметка кровли – -690 м). Определение кровли толбачанской свиты в процессе бурения не представляет большой сложности в связи с наличием регионального маркера – маломощного пласта каменной соли. Глубина залегания подошвы определялась только после уточнения и корреляции выполненных полевых исследований керна и комплекса геофизических исследований скважин. В результате было установлено, что подошва свиты в пределах шахтного поля трубки «Мир» находится на глубине 1410 м от дневной поверхности (абсолютная отметка – -1072 м). Толбачанская свита согласно залегает на породах эльганской свиты, перекрыта породами олекминской свиты [13, 14].

После выделения границ толбачанской свиты в разрезе был выполнен комплексный





анализ проведенных поинтервальных испытаний, постановки комплексного оборудования для исследования, газового каротажа, а также сопоставление химического состава природных газов, определенных по отобраным пробам в процессе выполнения бурения. Выделение коллекторов основывалось на качественной интерпретации проведенного комплекса геофизических исследований скважин, полевых исследований кернового материала и результатах поинтервальных опытно-фильтрационных испытаний с использованием пакерных установок.

Изучение интенсивности газовыделения было выполнено посредством проведения поинтервальных опытно-фильтрационных работ с использованием пакерных установок. Всего было выполнено семь постановок. Рассмотрим каждую из них в отдельности.

Первая постановка выполнена в интервале 1031–1101 м от дневной поверхности. Проведены испытания коллекторов № 1–5. Время открытого периода составило 150 мин., время закрытого – 300 мин. Время открытого и закрытого периодов при всех последующих испытаниях было неизменным. Замеренное пластовое давление составило 44 кгс/см<sup>2</sup>, дебит пластовых газов – менее 10 м<sup>3</sup>/сут.

Вторая постановка выполнена в интервале 1085–1144 м от дневной поверхности. Проведены испытания коллекторов № 5 и 6. Замеренное пластовое давление составило 97 кгс/см<sup>2</sup>, дебит пластовых газов – менее 10 м<sup>3</sup>/сут.

Третья постановка выполнена в интервале 1124–1197 м от дневной поверхности. Проведены испытания коллекторов № 7 и 8. Замеренное пластовое давление составило 143,4 кгс/см<sup>2</sup>, дебит пластовых газов – 72,3 м<sup>3</sup>/сут.

Четвертая постановка выполнена в интервале 1182–1249 м от дневной поверхности. Проведены испытания коллекторов № 9 и 10. Замеренное пластовое давление составило 122,2 кгс/см<sup>2</sup>, дебит пластовых газов – 136,5 м<sup>3</sup>/сут.

Пятая постановка выполнена в интервале 1244–1301 м от дневной поверхности. Проведены испытания коллекторов № 10–12. Замеренное пластовое давление составило 150 кгс/см<sup>2</sup>, дебит пластовых газов – 134 м<sup>3</sup>/сут.

Шестая постановка выполнена в интервале 1297–1349 м от дневной поверхности. Проведены испытания коллекторов № 12–14. Замеренное пластовое давление составило 139,2 кгс/см<sup>2</sup>, дебит пластовых газов – 20,5 м<sup>3</sup>/сут.

Седьмая постановка выполнена в интервале 1344–1401 м от дневной поверхности. Проведены испытания коллекторов № 14–17. Замеренное пластовое давление составило 143,5 кгс/см<sup>2</sup>, дебит пластовых газов – 136,5 м<sup>3</sup>/сут.

### Результаты исследования и их обсуждение

Литологический состав толбачанской свиты (Є<sub>1</sub> tb) в пределах шахтного поля трубки «Мир» по основным литотипам идентичен составу вмещающих пород трубки «Интернациональная». Свита сложена преимущественно карбонатными породами, представленными известковистыми, кремневыми, глинистыми доломитами, а также доломитами различной степени пелитоморфности. Галогенные и терригенно-карбонатные породы занимают подчиненное положение [9, 15]. Выполненное ранее, в предыдущих исследованиях, разделение свиты на две пачки [4] справедливо и для изучаемой площади:

- нижняя пачка – карбонатная, представлена плотными мелко-тонкозернистыми доломитами, слоистыми доломитами с прослоями глинистых доломитов и засоленных доломитов и ангидритов; нефтенасыщенность проявляется в виде пятен (выпоты по трещинам, порам) темно-коричневого цвета;

- верхняя пачка – галогенно-карбонатная мощностью 125 м, с соленасыщенностью до 50 %, с включениями твердых битумов; в разрезе пачки выделяется 9 пластов каменной соли суммарной мощностью более 60 м.

Необходимо отметить, что верхняя пачка не обладает каким-либо значимым флюидонасыщением и по своей сути является водупором для насыщенных хлоридно-кальциевых рассолов толбачанской свиты и «покрышкой» для формирования неструктурных газовых скоплений и газонасыщенных коллекторов.

Наличие в пределах шахтного поля трубки «Мир» тектонических нарушений способствует образованию неструктурных литолого-



тектонически экранированных скоплений углеводородных газов, но данные скопления будут иметь весьма ограниченные размеры, что зависит от литолого-фациальных особенностей объекта изучения [16].

Газодинамическая характеристика отложения толбачанской свиты осуществлена на основе исследований, проведенных в 2019–2020 гг. по скважине № 309, так как данная скважина вскрыла отложения на полную мощность. По результатам интерпретации проведенных исследований в пределах шахтного поля трубки «Мир» было выделено 17 пластов-коллекторов, 6 из которых являются газонасыщенными, а 11 – сложной флюидной насыщенности, так как содержат природные рассолы, углеводородные газы, мальты и нефти.

Выделенные коллекторы состоят из отдельных пропластков, всего по результатам полевых исследований керна и интерпретации проведенного комплекса геофизических исследований скважин был выделен 41 интервал, характеризующийся коллекторскими свойствами. Мощность отдельных пластов-коллекторов изменяется от 0,2 до 12 м. Характеристика выделенных коллекторов приведена в табл. 1.

В результате комплексного анализа проведенных работ в разрезе толбачанской свиты шахтного поля трубки «Мир» было выделено

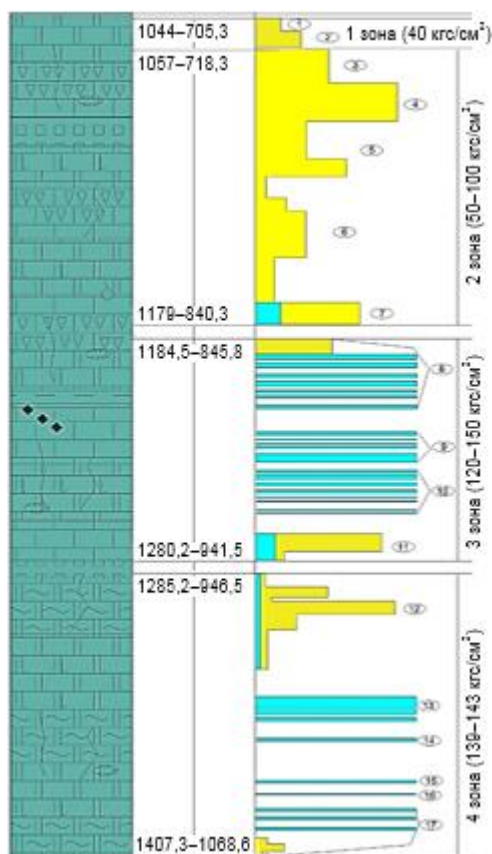
четыре зоны, различные по флюидонасыщению и величине пластовых давлений. Каждая зона характеризуется сложным строением и состоит из нескольких характеристических интервалов (рисунок).

Зона № 1 выделяется в интервале 1044–1057 м (абсолютные отметки – -705,3 / -718,3 м) и характеризуется наименьшим пластовым давлением, равным 40 кгс/см<sup>2</sup>, состоит из коллекторов № 1 и 2. Несмотря на низкую пористость в зонах динамического влияния тектонических нарушений, в данной зоне возможно накопление микрозалежей пластовых газов, обусловленное наличием открытой трещиноватости.

Зона № 2 располагается в интервале 1057–1179 м (абсолютные отметки – -718,3 / -840,3 м). Пластовое давление в пределах зоны изменяется от 50 до 120 кгс/см<sup>2</sup>. Наиболее напорным является коллектор № 7, так как он имеет смешанную рассольно-газовую насыщенность. Зона включает коллекторы № 3–7. Несмотря на невысокую пористость в зонах динамического влияния тектонических нарушений, в данной зоне также возможно формирование «дополнительной емкости» и, следовательно, объемов пластового газа и природного насыщенного рассола. Впрочем, данное замечание справедливо и для следующих зон.

**Таблица 1. Характеристика коллекторов толбачанского комплекса**  
**Table 1. Characteristics of the Tolbachan formation reservoirs**

Номер коллектора	Кровля, м	Подошва, м	Мощность, м	Пористость, %	Примечание
1	1044	1049,5	3,8	2–7	Газонасыщенный
2	1050,2	1055,1	4	6–9	Газонасыщенный
3	1057	1068	7,6	7–15	Газонасыщенный
4	1070	1085,8	9,9	8–20	Газонасыщенный
5	1089,2	1113	22,1	4–18	Газонасыщенный
6	1114	1160	24,8	5–12	Газонасыщенный
7	1162	1179	7,8	8–20	Газо-водонасыщенный
8	1184,5	1208,8	13,6	11–26	Газо-водонасыщенный
9	1218,8	1240	11,8	7–12	Водонасыщенный
10	1242,8	1254,8	9,5	4–14	Водонасыщенный
11	1262,6	1280,2	8,2	7–24	Газо-водонасыщенный
12	1291,8	1300,8	5,4	4–16	Газо-водонасыщенный
13	1316	1326,8	5	5–16	Водонасыщенный
14	1336	1346,8	8	8–26	Водонасыщенный
15	1354,2	1355,6	1,4	10–19	Водонасыщенный
16	1373	1379,4	1,6	11–20	Водонасыщенный
17	1385,4	1395	3,8	9–37	Газо-водонасыщенный



**Расположение и взаимоотношение  
(в разрезе) выделенных зон  
(голубое – вода, желтое – газ)**

**Location of identified zones and their  
relationship (in section)**  
(water is marked with blue, gas – with yellow)

Зона № 3 выделяется в интервале 1184,5–1280,2 м (абсолютные отметки – -845,8 / -941,5 м). Пластовое давление в пределах зоны составляет 120–150 кгс/см<sup>2</sup>. Зона включает коллекторы № 8–11. Данная зона является более газо- и водообильной, чем зоны № 1 и 2. Отличительной особенностью отложений толбачанской свиты в пределах около-трубного пространства кимберлитовой трубки «Мир» является отсутствие «сухих» коллекторов. Коллекторы № 10 и 11 имеют

смешанный тип насыщения и пластовое давление, превышающее давление коллекторов-аналогов (трубки «Интернациональная») в четыре раза.

Зона № 4 находится в интервале 1285,2–1407,3 м (абсолютные отметки – -946,5 / -1068,6 м). Пластовое давление в пределах зоны составляет 139–143 кгс/см<sup>2</sup>. Зона включает коллекторы № 12–17. Газонасыщенность данной зоны сопоставима с газонасыщенностью зоны № 3, водонасыщенность же ее выше на 20–30 %.

Как видно из приведенного описания, данные зоны отличаются друг от друга пластовым давлением, причем его изменение не обусловлено глубиной залегания коллекторов, что подтверждает правильность выделения в пределах толбачанской свиты именно водоносного комплекса, так как изучаемый объект обладает всеми необходимыми качественными и количественными характеристиками<sup>1</sup>.

Природные пластовые газы углеводородного состава, содержащиеся в коллекторах толбачанской свиты, и их химический состав приведены в табл. 2.

### Заключение

На основе обработки и анализа выполненных полевых работ и экспериментов, изучения результатов натурных наблюдений и результатов опробования с их последующей интерпретацией правомерным будет сделать ряд следующих выводов и обобщений.

1. Подтверждена газонасыщенность пород толбачанской свиты, произведено выделение газонасыщенных коллекторов, что в свою очередь позволяет говорить о существенной роли объекта изучения в формировании сложных условий отработки запасов трубки «Мир».

**Таблица 2. Результаты химических анализов проб пластовых газов (скважина 309)**  
**Table 2. Results of chemical analyses of formation gas samples (well 309)**

Свита	Интервал: от дневной поверхности а.о., м	Среднее содержание компонента в пробе, объемная доля, %				
		CH <sub>4</sub> (метан)	C <sub>2</sub> H <sub>6</sub> (этан)	C <sub>3</sub> H <sub>8</sub> (пропан)	C <sub>4</sub> H <sub>10</sub> (бутан)	C <sub>5</sub> H <sub>12</sub> (пентан)
Толбачанская	1033,0–1408,8 м -694,3 / -1070,1 м	93,99	5,25	0,60	0,13	0,03

<sup>1</sup> Климентов П. П., Кононов В. М. Методика гидрогеологических исследований: учебник для студентов. М.: Высшая школа, 1989. 448 с.



2. В целом по разрезу нижняя карбонатная пачка толбачанской свиты из-за наличия различных структурно-генетических типов, а также изменчивости литологического состава и фильтрационно-емкостных свойств способствовала формированию выделенных зон различного флюидонасыщения. Формирование коллекторов различных типов обусловлено разнофациальным характером отложений. Это проявляется в значительной неоднородности строения. Интенсивно проявившиеся процессы залечивания первичных пустот кальцитом, ангидритом, солью, а также перекристаллизации первичного осадка значительно усложнили строение порового пространства, за счет чего высокопористые разности частично утратили свою емкость. Процессы доломитизации, выщелачивания и трещинообразования обеспечили развитие дополнительных видов пустот, способствовали формированию сложных типов коллекторов и, следовательно, формированию «линз-микрозалежей».

3. Коллекторы толбачанской свиты характеризуются достаточно высокой газообильностью и высокими пластовыми давлениями. В связи с этим при дальнейшей разработке глубоких горизонтов в отложениях толбачанской свиты необходимо предусматривать опережающее бурение для раздегазации вмещающего массива. Проектирование дегазационных скважин, расчет длин кондукторов, опресовочных давлений и устьевых обвязок необходимо производить с учетом выделенных в разрезе толбачанской свиты зон [17–19].

4. Характеристика и выделение коллекторов в толбачанской свите в пределах шахтного поля трубки «Мир» является основой как для текущей газодинамической характеристики условий месторождения, так и для последующих исследований, направленных на повышение детализации [20], необходимой для учета особенностей структурно-тектонического строения объекта изучения.

#### Список источников

1. Айнбиндер И. И., Каплунов Д. Р. Риск-ориентированный подход к выбору геотехнологий подземной разработки месторождений на больших глубинах // Горный информационно-аналитический бюллетень (научно-технический журнал). 2019. № 4. С. 5–19. <https://doi.org/10.25018/0236-1493-2019-04-0-5-19>.
2. Айнбиндер И. И., Пацкевич П. Г., Красюкова Е. В. Обоснование параметров опасных зон при комбинированной разработке кимберлитовых месторождений Якутии // Известия Тульского государственного университета. Науки о Земле. 2019. № 3. С. 48–60.
3. Vokhmin S. A., Trebush Yu. P., Kurchin G. S., Mayorov E. S., Zajtseva K. V. Peculiarities in setting norms of extraction in underground mining of diamond ore // Universal Journal of Engineering Science. 2014. Vol. 2. Iss. 2. P. 39–42. <https://doi.org/10.13189/ujes.2014.020201>.
4. Янников А. М. Газодинамическая характеристика коллекторов во внешнем контуре месторождения «трубка Интернациональная» // Вестник Воронежского государственного университета. Геология. 2018. № 4. С. 98–101. <https://doi.org/10.17308/geology.2018.4/1672>.
5. Davis G. A., Newman A. M. Modern strategic mine planning // Proceedings of the Australian Mining Technology Conference. Carlton, 2008. P. 129–139.
6. Соколов И. В., Антипин Ю. Г., Никитин И. В. Принципы формирования и критерий оценки геотехнологической стратегии освоения переходных зон рудных месторождений подземным способом // Горный информационно-аналитический бюллетень (научно-технический журнал). 2017. № 9. С. 151–160. <https://doi.org/10.25018/0236-1493-2017-9-0-151-160>.
7. Jakubec J. Kimberlite emplacement models – the implications for mining projects // Journal of Volcanology and Geothermal Research. 2008. Vol. 174. Iss. 1-3. P. 20–28. <https://doi.org/10.1016/j.jvolgeores.2007.12.038>.
8. Агринский А. В. Результаты изучения гидрогеологических условий при разведке одной из кимберлитовых трубок в Западной Якутии // Труды Всесоюзного научно-исследовательского института гидрогеологии и инженерной геологии. 1980. № 135. С. 48–57.
9. Дроздов А. В., Крамсков Н. П., Дойников Ю. А., Сороченко М. К. К вопросу о предотвращении газодинамических явлений при проходке горных выработок на руднике «Удачный» // Горный журнал. 2012. № 12. С. 27–20.
10. Hustralid W. A., Seegmiller B., Stephansson O. In-the-wall haulage for open-pit mining // Mining Engineering. 1987. Vol. 39. Iss. 2. P. 119–123.
11. Акишев А. Н., Зырянов И. В., Шубин Г. В., Тарасов П. И., Журавлев А. Г. Техно-технологический комплекс для доработки запасов на глубинных горизонтах алмазорудных карьеров // Горный журнал. 2012. № 12. С. 39–43.
12. Дроздов А. В., Колганов В. Ф., Акишев А. Н. Горно-геологические особенности алмазных месторождений Якутии. LAP Lambert Academic Publishing, 2015. 576 с.
13. Гидрогеология СССР. Том XX. Якутская АССР / ред. Л. И. Ефимов, И. К. Зайцев. М.: Недра, 1970. 384 с.
14. Sobolev V. N., Taylor L. A., Snyder G. A., Sobolev N. V. Diamondiferous eclogites from the Udachnaya kimberlite pipe, Yakutia // International Geology Review.



1994. Vol. 36. Iss. 1. P. 42–61. <https://doi.org/10.1080/00206819409465448>.

15. Фукс А. Б., Фукс Б. А. Причины различных пластовых давлений в газоконденсатных залежах Непского свода // Геология нефти и газа. 1976. № 10. С. 48–54.

16. Ваганов В. И. Алмазные месторождения России и мира. М.: Геоинформмарк, 2000. 396 с.

17. Крайча Я. Газы в подземных водах: их свойства, разведка и использование / пер. с чешск.. М.: Недра, 1980. 343 с.

18. Ганченко М. В., Акишев А. Н., Бахтин В. А. Определение границ и оптимизация технологических

параметров открытых горных работ // Горный журнал. 2005. № 7. С. 77–80.

19. Dubiński J. Sustainable development of mining mineral resources // Journal of Sustainable Mining. 2013. Vol. 12. Iss. 1. P. 1–6. <https://doi.org/10.7424/jsm130102>.

20. Анохин Р. В., Петров А. Н. Первый опыт применения слоевой системы разработки с увеличенными параметрами очистных выработок на руднике «Интернациональный» // Горный информационно-аналитический бюллетень (научно-технический журнал). 2011. № 12. С. 11–15.

## References

1. Aynbinder I. I., Kaplunov D. R. Risk-based approach to selection of deep-level mining technology. *Gornyi informatsionno-analiticheskii byulleten' (nauchno-tekhnicheskii zhurnal) = Mining informational and analytical bulletin (scientific and technical journal)*. 2019;4:5-19. (In Russ.). <https://doi.org/10.25018/0236-1493-2019-04-0-5-19>.

2. Ainbinder I. I., Patskevich P. G., Krasyukova E. V. Substantiation of dangerous area parameters in the combined development of kimberlite deposits of Yakutia. *Izvestiya Tul'skogo gosudarstvennogo universiteta. Nauki o Zemle = Bulletin of the Tula State University*. 2019;3:48-60. (In Russ.).

3. Vokhmin S. A., Trebush Yu. P., Kurchin G. S., Mayorov E. S., Zaitseva K. V. Peculiarities in setting norms of extraction in underground mining of diamond ore. *Universal Journal of Engineering Science*. 2014;2(2):39-42. <https://doi.org/10.13189/ujes.2014.020201>.

4. Yannikov A. M. The gasdynamic characteristic of the collectors in external circuit of field the "tube International". *Vestnik Voronezhskogo gosudarstvennogo universiteta. Geologiya = Proceedings of Voronezh State University. Geology*. 2018;4:98-101. (In Russ.). <https://doi.org/10.17308/geology.2018.4/1672>.

5. Davis G. A., Newman A. M. Modern strategic mine planning. *Proceedings of the Australian Mining Technology Conference*. Carlton; 2008. p.129–139.

6. Sokolov I. V., Antipin Yu. G., Nikitin I. V. Basic principles and assessment criteria of technological strategy for underground mining in transition zones. *Gornyi informatsionno-analiticheskii byulleten' (nauchno-tekhnicheskii zhurnal) = Mining informational and analytical bulletin (scientific and technical journal)*. 2017;9:151-160. (In Russ.). <https://doi.org/10.25018/0236-1493-2017-9-0-151-160>.

7. Jakubec J. Kimberlite emplacement models – the implications for mining projects. *Journal of Volcanology and Geothermal Research*. 2008;174(1-3):20-28. <https://doi.org/10.1016/j.jvolgeores.2007.12.038>.

8. Agrinskii A. V. The results of studying hydrogeological conditions under the exploration of one of Western Yakutia kimberlite pipe. *Trudy Vsesoyuznogo nauchno-issledovatel'skogo instituta gidrogeologii i inzhenernoi geologii*. 1980;135:48–57. (In Russ.).

9. Drozdov A. V., Kramskov N. P., Doinikov Yu. A., Sorochenko M. K. To the question about the prevention of gas-dynamic phenomena, during the excavation develop-

ment at the "Udachnyy" mine. *Gornyi zhurnal*. 2012;12:27–20. (In Russ.).

10. Hustralid W. A., Seegmiller B., Stephansson O. In-the-wall haulage for open-pit mining. *Mining Engineering*. 1987;39(2):119-123.

11. Akishev A. N., Zyryanov I. V., Shubin G. V., Tarasov P. I., Zhuravlev A. G. Technical and engineering complex for the reserves improvement on the deep horizons of diamondiferous open pits. *Gornyi zhurnal*. 2012;12:39-43. (In Russ.).

12. Drozdov A. V., Kolganov V. F., Akishev A. N. *Mining-geological peculiarities of primary deposits of Yakutian diamonds*. LAP Lambert Academic Publishing; 2015. 576 p. (In Russ.).

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

14. Sobolev V. N., Taylor L. A., Snyder G. A., Sobolev N. V. Diamondiferous eclogites from the Udachnaya kimberlite pipe, Yakutia. *International Geology Review*. 1994; 36(1):42-61. <https://doi.org/10.1080/00206819409465448>.

15. Fuks A. B., Fuks B. A. Causes of various reservoir pressures in the gas condensate deposits of the Nepa uplift. *Geologiya nefi i gaza = Russian Oil and Gas Geology*. 1976;10:48-54. (In Russ.).

16. Vaganov V. I. *Diamond deposits in Russia and in the world*. Moscow: Geoinformmark; 2000. 396 p. (In Russ.).

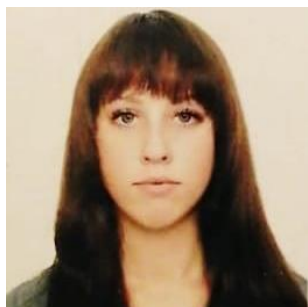
17. Kraja J. Gases in groundwater. their properties, exploration and use. 1980. 343 p. (Russ. ed.: *Gazy v podzemnykh vodakh: ikh svoistva, razvedka i ispol'zovanie*. Moscow: Nedra; 1980. 343 p.).

18. Ganchenko M. V., Akishev A. N., Bakhtin V. A. Determination of the borders and optimization of technological parameters in opencast mining works. *Gornyi zhurnal*. 2005;7:77-80. (In Russ.).

19. Dubiński J. Sustainable development of mining mineral resources. *Journal of Sustainable Mining*. 2013;12(1):1-6. <https://doi.org/10.7424/jsm130102>.

20. Anokhin R. V., Petrov A. N. Pilot application experience of a layered mining system with increased parameters of stope workings at the International mine. *Gornyi informatsionno-analiticheskii byulleten' (nauchno-tekhnicheskii zhurnal) = Mining informational and analytical bulletin (scientific and technical journal)*. 2011;12:11-15. (In Russ.).



**Информация об авторах / Information about the authors**

**Янникова Светлана Александровна,**  
ведущий инженер Лаборатории горно-геологических  
проблем разработки месторождений,  
Институт «Якутнипроалмаз» АК «АЛРОСА» (ПАО),  
г. Мирный, Россия,  
yannikovasa@yandex.ru,  
<https://orcid.org/0000-0001-7297-0725>.  
**Svetlana A. Yannikova,**  
Leading Engineer of the Laboratory of Mining and Geological  
Problems of Field Development,  
Yakutniproalmaz Institute, PJSC ALROSA,  
Mirny, Russia,  
yannikovasa@yandex.ru,  
<https://orcid.org/0000-0001-7297-0725>.



**Янников Алексей Михайлович,**  
кандидат геолого-минералогических наук,  
заведующий Лабораторией горно-геологических  
проблем разработки месторождений,  
Институт «Якутнипроалмаз» АК «АЛРОСА» (ПАО),  
г. Мирный, Россия,  
yannikov90@mail.ru,  
<https://orcid.org/0000-0002-2169-123X>.  
**Aleksey M. Yannikov,**  
Cand. Sci. (Geol. & Mineral.),  
Head of the Laboratory of Mining and Geological Problems of Field Development,  
Yakutniproalmaz Institute, PJSC ALROSA,  
Mirny, Russia,  
yannikov90@mail.ru,  
<https://orcid.org/0000-0002-2169-123X>.

**Вклад авторов / Contribution of the authors**

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

**Конфликт интересов / Conflict of interests**

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

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

**Информация о статье / Information about the article**

Статья поступила в редакцию 26.03.2021; одобрена после рецензирования 14.07.2021; принята к публикации 19.08.2021.

The article was submitted 26.03.2021; approved after reviewing 14.07.2021; accepted for publication 19.08.2021.



Научная статья

УДК 550.370

<https://doi.org/10.21285/2686-9993-2021-44-3-301-311>



## Проявление сигнала вызванной поляризации на многоразносных установках в условиях акваторий с глубиной моря до 100 м

Евгений Валерьевич Агеенков<sup>а</sup>, Александр Анатольевич Ситников<sup>б</sup>,  
Елена Николаевна Воднева<sup>с</sup>

<sup>а</sup>Институт нефтегазовой геологии и геофизики им. А. А. Трофимука СО РАН, г. Новосибирск, Россия

<sup>б</sup>ООО «Сибирская геофизическая научно-производственная компания», г. Иркутск, Россия

<sup>с</sup>Лимнологический институт СО РАН, г. Иркутск, Россия

Автор, ответственный за переписку: Агеенков Евгений Валерьевич, AgeenkovEV@ipgg.sbras.ru

**Резюме.** Цель данной работы заключалась в иллюстрации проявления сигнала вызванной поляризации в сигнале переходного процесса для многоразносных осевых электрических установок в зависимости от разнота и размеров источника на разных глубинах погружения установки для условий акватории с глубиной моря до 100 м. В ходе исследования использовалось решение прямой задачи неуставовившегося электромагнитного поля для проводящих поляризующихся сред с описанием дисперсии удельного электрического сопротивления формулой Коула – Коула. Было проанализировано изменение сигнала переходного процесса  $\Delta U(t)$ , конечной разности сигнала переходного процесса  $\Delta^2 U(t)$  и трансформанты  $P1(t)$  – отношения  $\Delta^2 U(t)$  к  $\Delta U(t)$  – в зависимости от размеров многоразносной установки. В ходе исследования использовались установки с длиной источника – горизонтальной заземленной электрической линии АВ – от 50 до 500 м, а также длиной приемников – трехэлектродных электрических линий МОН – от 50 до 500 м и расстоянием между центрами источника и приемника (разносом), кратным длине источника:  $(3/2) \cdot AB$ ,  $2 \cdot AB$ ,  $(5/2) \cdot AB$ ,  $3 \cdot AB$ ,  $(7/2) \cdot AB$ ,  $4 \cdot AB$ ,  $(9/2) \cdot AB$ ,  $5 \cdot AB$ . Сравнивались сигналы от проводящей и проводящей поляризующейся модели. Многоразносная установка находилась внутри проводящей среды с проводящим поляризующимся основанием. Проводящая среда ассоциировалась с толщей морской воды в шельфовых областях с глубинами моря до 100 м. Проводящее поляризующееся основание представляло собой геологическую среду (землю), перекрытую слоем воды. Выполненные в результате проведенных работ расчеты показывают проявление различных составляющих переходного процесса, связанных со становлением электромагнитного поля и с проявлением низкочастотной дисперсии электромагнитных свойств земли, вызванной как гальваническим, так и вихревым током. Эти составляющие по-разному проявляются на многоразносных установках на разных глубинах погружения. Таким образом, можно утверждать, что составляющие переходного процесса, связанные со становлением электромагнитного поля и с гальванически и индукционно вызванной поляризацией, по-разному проявляются на многоразносных установках разных размеров, погруженных на разную глубину. Вызванная поляризация для условий акваторий проявляется двояко, так как она связана и с гальваническим, и с вихревым током. Ранее при практических измерениях проявление индукционно вызванной поляризации рассматривалось как проявление помех, но этот сигнал моделируемый и его можно рассматривать как информацию о вызванной поляризации. Фактором, влияющим на характер проявления сигнала вызванной поляризации в сигнале переходного процесса, является высота установки над дном  $\Delta h$  и разнос  $r$ .  $\Delta h$  – это расстояние между установкой и дном моря (поляризующимся основанием модели);  $r$  – расстояние между центрами источника и измерителя (трехэлектродной измерительной линии). В зависимости от высоты установки и разнота сигнал вызванной поляризации в трансформанте  $P1(t)$  может проявляться в виде как восходящей ветви на поздних временах, так и нисходящей ветви, переходящей в отрицательные значения  $P1$ .

**Ключевые слова:** шельф, становление поля, гальванически вызванная поляризация, индукционно вызванная поляризация, переходный процесс, модель Коула – Коула, аквальная геоэлектрика, многоразносная осевая электрическая установка

**Финансирование:** работа выполнена при поддержке Программы фундаментальных научных исследований № 0331-2019-0007.

**Благодарности:** авторы благодарны доктору физико-математических наук, доценту, главному научному сотруднику Института нефтегазовой геологии и геофизики им. А. А. Трофимука СО РАН Е. Ю. Антонову за ценные советы по улучшению структуры и содержания публикации, а также доктору геолого-минералогических наук, профессору, главному научному сотруднику Института нефтегазовой геологии и геофизики им. А. А. Трофимука СО РАН Н. О. Кожевникову за ценные советы и обсуждение исследования.

© Агеенков Е. В., Ситников А. А., Воднева Е.Н., 2021



**Для цитирования:** Агеев Е. В., Ситников А. А., Воднева Е. Н. Проявление сигнала вызванной поляризации на многоэлектродных установках в условиях акваторий с глубиной моря до 100 м // Науки о Земле и недропользование. 2021. Т. 44. № 3. С. 301–311. <https://doi.org/10.21285/2686-9993-2021-44-3-301-311>.

## Original article

# Induced polarization signal manifestation in multi-spacing installations in offshore areas up to 100 m deep

Evgeniy V. Ageenkov<sup>a</sup>, Aleksandr A. Sitnikov<sup>b</sup>, Elena N. Vodneva<sup>c</sup>

<sup>a</sup>Trofimuk Institute of Petroleum Geology and Geophysics, Siberian Branch  
of the Russian Academy of Sciences, Novosibirsk, Russia

<sup>b</sup>Siberian Geophysical Research Production Company LLC, Irkutsk, Russia

<sup>c</sup>Limnological Institute, Siberian Branch of the Russian Academy of Sciences, Irkutsk, Russia

Corresponding author: Evgeniy V. Ageenkov, AgeenkovEV@ipgg.sbras.ru

**Abstract.** The purpose of the work is to show the manifestation of an induced polarization signal in the transient electromagnetic signal for multi-spacing axial electrical installations depending on the spacing and sizes of the source at different depths of installation for the offshore conditions of sea depth of up to 100 m. The study uses the solution of the direct problem of a transient electromagnetic field for conducting polarizable media with a description of electrical resistivity dispersion by the Cole – Cole formula. Analysis is given to the change in the transient signal  $\Delta U(t)$ , final difference of the transient signal  $\Delta^2 U(t)$  and transform  $P_1(t)$  (ratio of  $\Delta^2 U(t)$  to  $\Delta U(t)$ ) depending on multi-spacing installation size. The study involves installations with a source length (a source is a horizontal grounded electrical line AB) from 50 to 500 m, receiver length (receiver is represented by three-electrode electrical lines) from 50 to 500 m, and distance between the centers of the source and receiver (spacing) multiple of the source length:  $(3/2) \cdot AB$ ,  $2 \cdot AB$ ,  $(5/2) \cdot AB$ ,  $3 \cdot AB$ ,  $(7/2) \cdot AB$ ,  $4 \cdot AB$ ,  $(9/2) \cdot AB$ ,  $5 \cdot AB$ . Comparison is given to the signals from conductive model and conductive polarizing model. A multi-spacing installation was placed inside a conductive medium with a conductive polarizing base. The conductive medium was associated with the layer of sea water in offshore areas with sea depths of up to 100 m. The conductive polarizing base was represented by a geological formation (ground) covered by a layer of water. Calculations performed as a result of conducted research works show the manifestation of various components of the transient process associated with electromagnetic field formation and manifestation of low-frequency dispersion of the electromagnetic properties of the earth caused by both galvanic and eddy currents. These components manifest themselves in different ways on multi-spacing installations at different depths. Therefore, it could be argued that the components of the transient process associated with the transient electromagnetic field, galvanically induced polarization and inductive induced polarization manifest themselves in different ways in multi-spaced installations of different sizes immersed at different depths. Induced polarization manifests itself in two ways for water area conditions as it is associated with both galvanic and eddy currents. Previously, when performing practical measurements, the manifestation of inductive induced polarization was considered as interference manifestation. But being simulated this signal can be considered as information about induced polarization. The factor influencing the manifestation character of induced polarization signal in the transient signal is the installation height above the bottom  $\Delta h$  and the spacing  $r$ .  $\Delta h$  is the distance between the installation and the seafloor, which is a polarizing base of the model.  $r$  is the distance between the centers of the source and the meter represented by a three-electrode measuring line. Depending on the installation height and spacing the induced polarization signal in the transform  $P_1(t)$  can appear as an ascending branch at later times, as well as in the form of a descending branch that turns into negative values of  $P_1$ .

**Keywords:** shelf, transient electromagnetic (TEM) field, galvanically induced polarization, inductive induced polarization, transient, Cole – Cole model, marine geoelectrics, multi-spacing axial electrical installation

**Funding:** the research is funded by the Fundamental Research program no. 0331-2019-0007.

**Acknowledgements:** the authors thank Doctor of Physical and Mathematical Sciences, Associate Professor, Chief Researcher of the Trofimuk Institute of Petroleum Geology and Geophysics SB RAS E. Yu. Antonov for precious advice on improving the structure and content of the article. We are also grateful to Doctor of Geological and Mineralogical Sciences, Professor, Chief Researcher of the Trofimuk Institute of Petroleum Geology and Geophysics SB RAS N. O. Kozhevnikov for valuable guidelines and research scrutiny.

**For citation:** Ageenkov E. V., Sitnikov A. A., Vodneva E. N. Induced polarization signal manifestation in multi-spacing installations in offshore areas up to 100 m deep. *Nauki o Zemle i nedropol'zovanie = Earth sciences and subsoil use*. 2021;44(3):301-311. (In Russ.). <https://doi.org/10.21285/2686-9993-2021-44-3-301-311>.



## Введение

Представленная работа завершает ряд публикаций, касающихся проявления сигнала вызванной поляризации (ВП) в сигнале переходного процесса для условий акваторий с глубиной моря до 100 м<sup>1-3</sup>. Актуальность исследования определяется одним из современных направлений поисков новых крупных месторождений полезных ископаемых – шельфовых обрамлений континентальных платформ [1, 2]. Для отечественной нефтегазовой геологии перспективной территорией является шельф северных морей, глубина которых на значительной площади акваторий не превышает 100 м.

Проведение электроразведочных работ на шельфе морей направлено на изучение электромагнитных свойств геологической среды, находящейся под водным слоем, таких как проводящие и поляризационные характеристики. Слой воды без дополнительного рассмотрения – сильно проводящая однофазная и однородная среда, не поляризующаяся при протекании внешнего тока или возникновении внешнего напряжения.

При изучении ВП существенное влияние на измерения оказывает электромагнитная индукция. При измерениях во временной области после выключения тока в течение некоторого времени происходит становление электромагнитного поля в земле и для определенных времен наблюдается суперпозиция индукционных и поляризационных эффектов [3]. Один из способов уменьшения проявления сигнала индукции в сигнале переходного процесса при работе в осевой области заземленной электрической линии (ЗЭЛ) – трансформация измерений трехэлектродной измерительной линии М<sub>1</sub>М<sub>2</sub>М<sub>3</sub>. Такие измеритель-

ные линии и трансформанты используются для изучения ВП при наземных измерениях дифференциально-нормированным методом электроразведки (ДНМЭ)<sup>4</sup> [4–6] и аквальным дифференциально-нормированным методом электроразведки (АДНМЭ) [7–11].

На акваториях АДНМЭ использует осевые многоэлектродные установки с длиной источника от 300 до 1000 м, ряд трехэлектродных измерительных линий (М<sub>1</sub>М<sub>2</sub>М<sub>3</sub>) от 200 до 600 м с разносом от 600 до 1500 м [12]. На каждой такой измерительной линии проводятся измерения сигнала переходного процесса  $\Delta U(t)$  (1) между электродами М<sub>1</sub>-М<sub>3</sub> и второй конечной разности сигнала переходного процесса  $\Delta^2 U(t)$  (2) между электродами М<sub>1</sub>-М<sub>2</sub> и М<sub>2</sub>-М<sub>3</sub>. Затем после обработки сигналов  $\Delta U(t)$  и  $\Delta^2 U(t)$  рассчитывается отношение конечной разности сигнала переходного процесса к сигналу переходного процесса – трансформанта  $P1(t)$  на линии М<sub>1</sub>М<sub>2</sub>М<sub>3</sub> (3) [4, 5].

$$\Delta U(t)_{M_1 M_3} = \Delta U(t)_{M_1 M_2} + \Delta U(t)_{M_2 M_3}, \quad (1)$$

$$\Delta^2 U(t)_{M_1 M_2 M_3} = \Delta U(t)_{M_1 M_2} - \Delta U(t)_{M_2 M_3}, \quad (2)$$

$$P1(t)_{M_1 M_2 M_3} = \frac{\Delta^2 U(t)_{M_1 M_2 M_3}}{\Delta U(t)_{M_1 M_3}} = \frac{\Delta U(t)_{M_1 M_2} - \Delta U(t)_{M_2 M_3}}{\Delta U(t)_{M_1 M_2} + \Delta U(t)_{M_2 M_3}}. \quad (3)$$

В полученной таким образом трансформанте  $P1(t)$  в поздней стадии становления в общем сигнале переходного процесса подавляется сигнал, связанный с вихревым током. Поведение  $\Delta U(t)$ ,  $\Delta^2 U(t)$  и  $P1(t)$  во время переходного процесса на трехэлектродной установке, расположенной в осевой области ЗЭЛ, разъяснялось в публикациях [7, 13] на примере двух геоэлектрических моделей. Для

<sup>1</sup> Воднева Е. Н., Агеенков Е. В., Ситников А. А. Проявление низкочастотной дисперсии электромагнитных свойств земли в измерениях переходного процесса на морских акваториях глубиной до 100 м // Науки о Земле и недропользование. 2019. Т. 42. № 4. С. 461–475. <https://doi.org/10.21285/2686-9993-2019-42-4-461-475>.

<sup>2</sup> Агеенков Е. В., Воднева Е. Н., Ситников А. А. Влияние продолжительности импульса и времени измерения переходного процесса на проявление низкочастотной дисперсии электромагнитных свойств земли в измерениях на акваториях с глубиной до 100 м // Науки о Земле и недропользование. 2020. Т. 43. № 1. С. 49–58. <https://doi.org/10.21285/2686-9993-2020-43-1-49-58>.

<sup>3</sup> Агеенков Е. В., Ситников А. А., Воднева Е. Н. Влияние размеров установки на проявление низкочастотной дисперсии электромагнитных свойств земли в измерениях на акваториях с глубиной до 100 м // Науки о Земле и недропользование. 2020. Т. 43. № 3. С. 325–338. <https://doi.org/10.21285/2686-9993-2020-43-3-325-338>.

<sup>4</sup> Легейдо П. Ю. Теория и технология дифференциально-нормированной геоэлектроразведки для изучения поляризующихся разрезов в нефтегазовой геофизике: дис. ... д-ра геолог.-минералог. наук. Иркутск, 1998. 198 с.



одной из них сигнал ВП главным образом связан с гальваническим током, для другой – с вихревым. Для первого случая в поздней стадии плотность вихревых токов выравнивается в нижнем полупространстве и пространственная неоднородность электромагнитного поля, создаваемая вихревым током, стремится к нулю. Поэтому на этой стадии переходного процесса трансформанта  $P1(t)$  определяется полем гальванически вызванной поляризации (ВПГ). Индукционно вызванная поляризация (ВПИ) в осевой области ЗЭЛ проявляется в смене знака сигнала переходного процесса  $\Delta U(t)$  [14], а для трехэлектродной измерительной установки – в смене знака второй конечной разности сигнала переходного процесса  $\Delta^2 U(t)$  и трансформанты  $P1(t)$  [13]. Описанные случаи показали, как трехэлектродная измерительная линия, расположенная в осевой области ЗЭЛ, позволяет выделить временные интервалы преобладания сигналов становления, ВПГ и ВПИ во время переходного процесса. Однако нужно подчеркнуть: несмотря на то, что ВП возбуждается вихревым или гальваническим током, природа сигнала ВПИ и ВПГ одинакова – это электрофизические, электрохимические и электрокинетические релаксационные процессы в многофазной гетерогенной геологической среде [15–19].

Хотя имеется большой опыт полевых измерений на различных акваториях, остаются не ясны возможности и ограничения съемки АДНМЭ с подводной буксируемой системой для изучения ВП при использовании разных установок и глубины их погружения в водный слой.

Цель данного исследования заключается в иллюстрации проявления эффекта ВП в сигнале переходного процесса на многоразностной осевой электрической установке при различных глубинах ее погружения в водный слой. Авторами были проведены расчеты переходного процесса  $\Delta U(t)$ , конечной разности сигнала переходного процесса  $\Delta^2 U(t)$  и транс-

форманты  $P1(t)$  для разных по размерам электрических установок и их положений в водном слое. Для численного эксперимента принята модель двухслойного полупространства. Первый слой, ассоциирующийся с морской толщей, – сильно проводящий неполяризующийся, имеет мощность 50 и 100 м. Его основание – геологические образования проводящие поляризующиеся. Исследовалось изменение сигнала при поляризуемости основания 0 и 15 %.

### Материалы и методы исследования

В основе исследования лежат результаты решения прямой задачи от одномерной проводящей поляризующейся среды для горизонтальной электрической компоненты неустановившегося электромагнитного поля. Авторами использовался метод линейной фильтрации решения задачи электромагнитного становления [20]. При расчетах первоначально вычислялась частотная характеристика сигнала в широком диапазоне частот, затем путем преобразования Фурье получалось решение во временной области. ВП среды учитывалась частотно зависимым удельным электрическим сопротивлением (УЭС) по формуле Коула – Коула (4) [18]:

$$\rho(\omega) = \rho_0 \left( 1 - \frac{\eta(i\omega\tau)^c}{1 + (i\omega\tau)^c} \right), \quad (4)$$

где  $\rho_0$  – УЭС на постоянном токе, Ом·м;  $\eta$  – коэффициент поляризуемости, доли ед.;  $\tau$  – постоянная времени, с;  $c$  – показатель степени, б.р.;  $\omega$  – круговая частота, с<sup>-1</sup>.

Для численного эксперимента была выбрана простая среда – двухслойное полупространство. Водный слой – хорошо проводящий, с УЭС 0,25 Ом·м, неполяризующийся. Проводящая геологическая среда – с УЭС 1,5 Ом·м, свойственным морским осадкам. Поляризуемость геологической среды изменялась и была задана 0 или 15 %. Мощность воды составляла 100 м (табл. 1, 2).

**Таблица 1. Модель проводящей среды**  
**Table 1. Conductive medium model**

Слой	Удельное электрическое сопротивление $\rho$ , Ом·м	Коэффициент поляризуемости $\eta$ , %	Мощность слоя $h$ , м
1	0,25	0	100
2	1,5	0	$\infty$



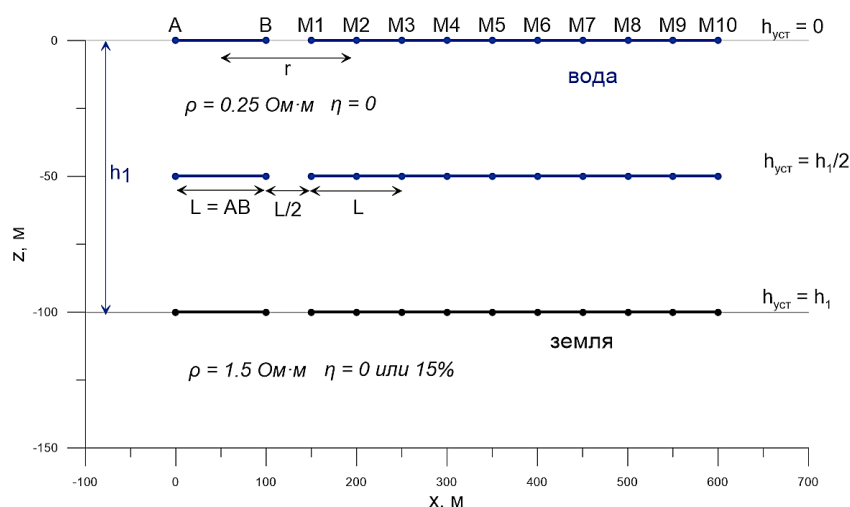


**Таблица 2. Модель проводящей среды с поляризуемым основанием**  
**Table 2. Conductive medium model with a polarizable base**

Слой	Удельное электрическое сопротивление $\rho$ , Ом·м	Коэффициент поляризуемости $\eta$ , %	Постоянная времени $\tau$ , с	Показатель степени $s$ , б.р.	Мощность слоя $h$ , м
1	0,25	0	—	—	100
2	1,5	15	1	0.5	$\infty$

Для численного эксперимента использовались несколько установок с длиной источника АВ, равной 50, 100, 250 и 500 м, рядом измерительных линий с длиной, равной длине источника, расположенных в осевой области на разносах, кратных его длине:  $(3/2) \cdot AB$ ,  $2 \cdot AB$ ,  $(5/2) \cdot AB$ ,  $3 \cdot AB$ ,  $(7/2) \cdot AB$ ,  $4 \cdot AB$ ,  $(9/2) \cdot AB$ ,  $5 \cdot AB$  (рис. 1, табл. 3). Таким образом, рассматривались установки, для которых разнос зависит от длины источника. Установки размещались на поверхности водного слоя, в его середине и на поверхности основания (земли) (см. рис. 1).

На многоэлектродных установках на каждой трехэлектродной измерительной линии проводились расчеты переходного процесса  $\Delta U(t)$ , конечной разности сигнала переходного процесса  $\Delta^2 U(t)$  и трансформанты  $P1(t)$ . Сигнал рассчитывался от модели двухслойного полупространства. Первый слой – морская вода сильно проводящая неполяризуемая мощностью  $h_1$  50 или 100 м с УЭС 0,25 Ом·м. Основание – геологические образования проводящие поляризуемые с УЭС 1,5 Ом·м и поляризуемостью  $\eta$  0 или 15 % (см. рис. 1), временем релаксации  $\tau$  0,5 с, показателем степени  $s$  0,5 б.р.



**Рис. 1. Схема электрических установок:**

AB – источник;  $M_1M_2M_3$ ,  $M_2M_3M_4$ ,  $M_3M_4M_5$ ,  $M_4M_5M_6$ ,  $M_5M_6M_7$ ,  $M_6M_7M_8$ ,  $M_7M_8M_9$ ,  $M_8M_9M_{10}$  – трехэлектродные измерительные линии;  $r$  – разнос (расстояние между центром источника и центром трехэлектродной измерительной линии)

**Fig. 1. Electrical installation diagram:**

AB – source;  $M_1M_2M_3$ ,  $M_2M_3M_4$ ,  $M_3M_4M_5$ ,  $M_4M_5M_6$ ,  $M_5M_6M_7$ ,  $M_6M_7M_8$ ,  $M_7M_8M_9$ ,  $M_8M_9M_{10}$  – 3-electrode measuring lines;  $r$  – spacing (distance between the center of the source and the center of the 3-electrode measuring line)

**Таблица 3. Характеристики установок численного эксперимента**  
**Table 3. Characteristics of numerical experiment installations**

Длина источника АВ, м	Разносы $r$ , м	Длина измерителя $M_1-M_2$ , $M_2-M_3$ , м
50	75, 100, 125, 150, 175, 200, 225, 250	25, 25
100	150, 200, 250, 300, 350, 400, 450, 500	50, 50
250	375, 500, 625, 750, 875, 1000, 1125, 1250	125, 125
500	750, 1000, 1250, 1500, 1750, 2000, 2250, 2500	250, 250



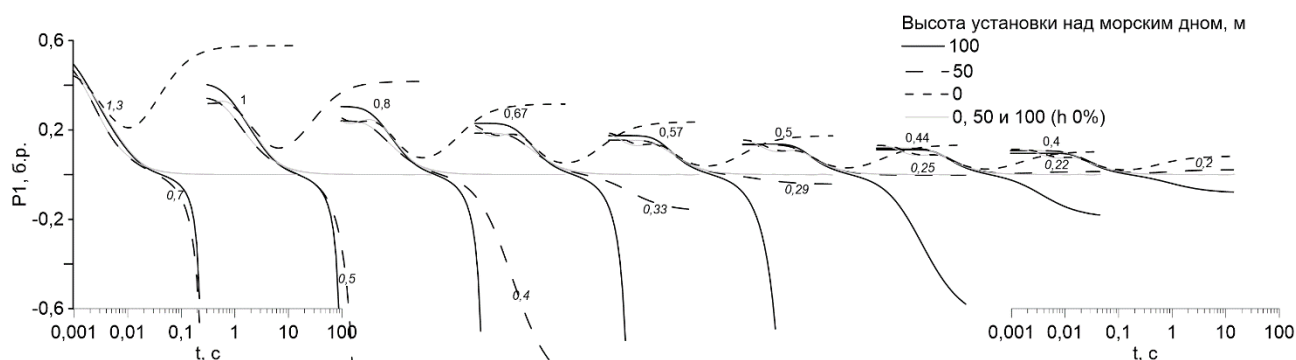
Сигнал переходного процесса рассчитывался на времени от 1 мс до 16 с после бесконечного импульса тока (импульс возбуждения – функция Хевисайда).

### Результаты исследования и их обсуждение

Вначале необходимо отметить, что оказалось удобно анализировать расчеты, используя не глубину погружения установки в водный слой, а высоту установки над дном акватории (поляризующимся основанием), поэтому дальнейшее изложение и выводы построены на основании такой терминологии.

Результаты расчетов представлены в виде графиков  $P_1(t)$  на всех разносах и всех высотах установки над дном акватории для поляризующегося и неполяризующегося основания. Графики для донных установок показаны сплошной линией, для установок, расположенных в середине водной толщи – широким пунктиром, для установок, расположенных на поверхности водного слоя – пунктирной линией (рис. 2–5). Тонкими серыми линиями показаны графики для модели с неполяризующимся основанием.

Нужно отметить основные тенденции проявления сигнала ВП в сигнале переходного процесса. Для установок, находящихся на дне, то есть на поверхности поляризующегося основания, сигнал ВП проявляется в виде сигнала ВПГ для всех разносов. Когда между поляризующимся основанием и установкой появляется неполяризующийся слой (при подъеме установки над дном), на разносах, расположенных ближе к источнику, ВП проявляется в виде сигнала ВПИ. Чем выше поднимается установка над дном, тем обширнее область ВП, связанная с вихревым током. При увеличении разноса интенсивность проявления сигнала ВП уменьшается, а при еще большем его увеличении сигнал ВП проявляется как сигнал ВПГ. Нужно напомнить, что в рассматриваемых установках длина источника определяет разносы установки, поэтому разнос подразумевается как величина, зависящая от длины источника. Таким образом, на основе выполненных расчетов видно, что от высоты установки над дном моря и от разноса зависит вид проявления сигнала ВП в сигнале переходного процесса – проявление его в виде сигнала ВПГ или ВПИ.

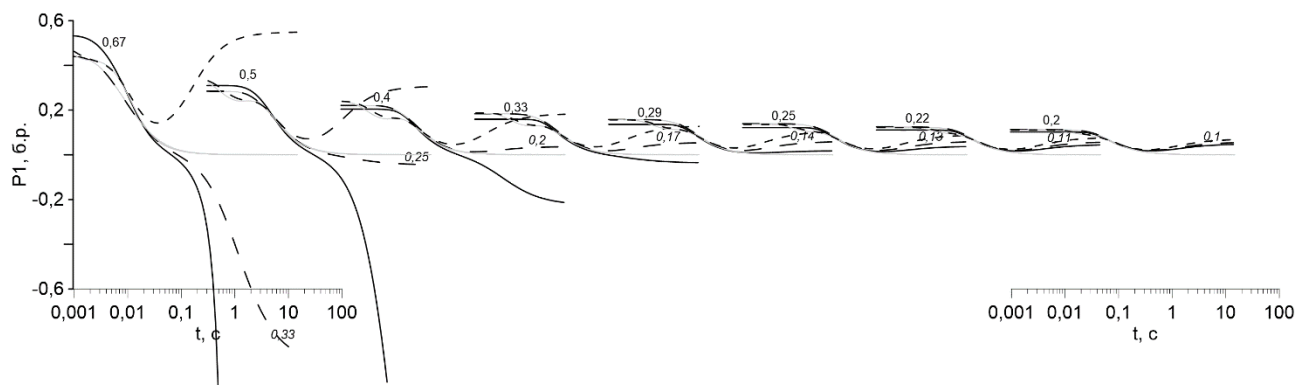


**Рис. 2. Изменение сигнала трансформанты  $P_1(t)$  для поляризующегося основания (земли) 15 % в зависимости от разноса и высоты установки над дном моря (землей) (длина источника – 50 м; длина разносов – 75, 100, 125, 150, 175, 200, 225, 250 м; высота установки – 100, 50 и 0 м при глубине акватории 100 м)**

Тонкими серыми линиями показан сигнал  $P_1(t)$  для проводящей неполяризующейся среды  
Индексы кривых: в области ранних времен – приведенная высота для установки, расположенной на поверхности воды; в области поздних времен – приведенная высота для установки, расположенной в середине водной толщи

**Fig. 2. Variations of the transform  $P_1(t)$  signal for a polarizable base (ground) is 15 % depending on installation spacing and height above the seafloor (ground) (source length is 50 m; spacing lengths – 75, 100, 125, 150, 175, 200, 225, 250 m; installation height – 100, 50 and 0 m at offshore area depth of 100 m)**

Thin grey lines show the signal  $P_1(t)$  for a non-polarizable conductive medium  
Curve indices: in early times area – reduced height for the installation located on water surface; in later times areas – reduced height for the installation located in the middle of the water layer

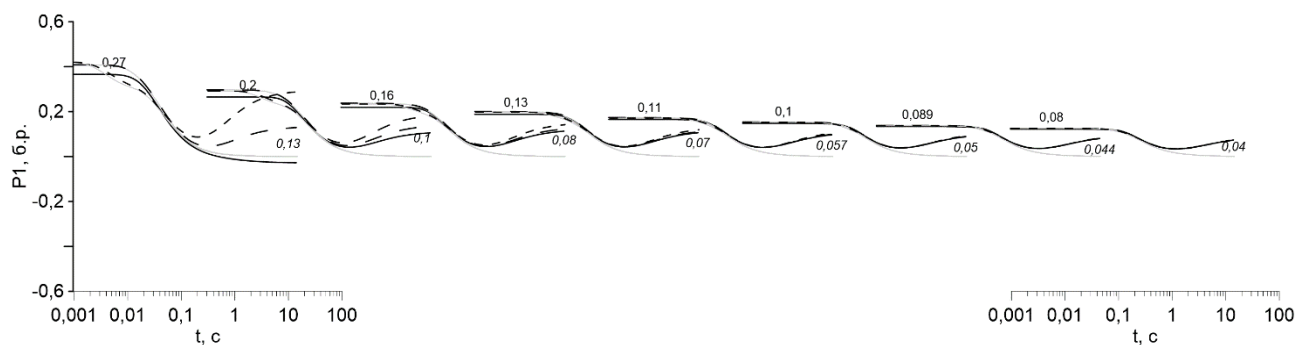


**Рис. 3. Изменение сигнала трансформанты  $P1(t)$  для поляризующегося основания (земли) 15 % в зависимости от разноса и высоты установки над дном моря (землей) (длина источника – 100 м; длина разносов – 150, 200, 250, 300, 350, 400, 450, 500 м; высота установки – 100, 50 и 0 м при глубине акватории 100 м)**

Пояснения к рисунку см. на рис. 2

**Fig. 3. Variations of the transform  $P1(t)$  signal for a polarizable base (ground) is 15 % depending on installation spacing and height above the seafloor (ground) (source length is 100 m; spacing length – 150, 200, 250, 300, 350, 400, 450, 500 m; installation height – 100, 50 and 0 m at offshore area depth of 100 m)**

See Fig. 2 for the legend



**Рис. 4. Изменение сигнала трансформанты  $P1(t)$  для поляризующегося основания (земли) 15 % в зависимости от разноса и высоты установки над дном моря (землей) (длина источника – 250 м; длина разносов – 375, 500, 625, 750, 875, 1000, 1125, 1250 м; высота установки – 100, 50 и 0 м при глубине акватории 100 м)**

Пояснения к рисунку см. на рис. 2

**Fig. 4. Variations of the transform  $P1(t)$  signal for a polarizable base (ground) is 15 % depending on installation spacing and height above the seafloor (ground) (source length is 250 m; spacing lengths – 375, 500, 625, 750, 875, 1000, 1125, 1250 m; installation height – 100, 50 and 0 m at offshore area depth of 100 m)**

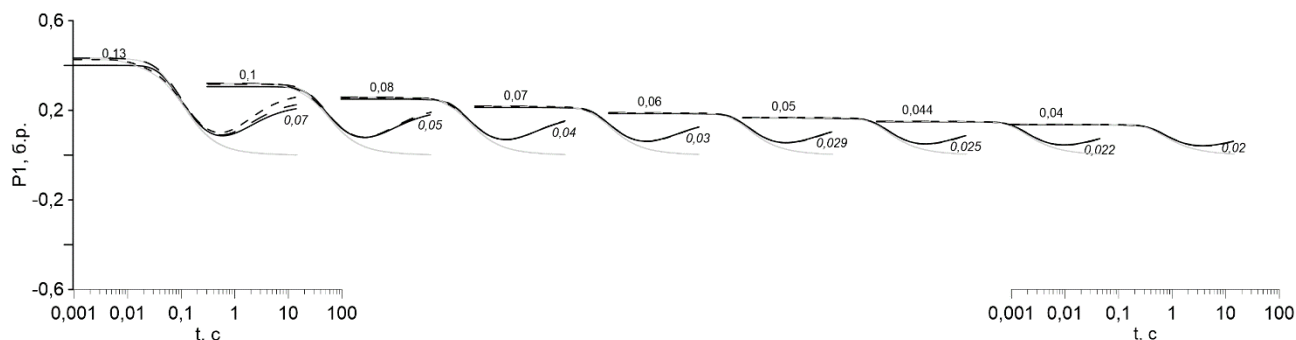
See Fig. 2 for the legend

Сравнить поведение сигналов для установок разного размера для разной глубины акватории оказалось возможным на основе отношения высоты установки к разному (приведенная высота установки).

Графики (см. рис. 2–5) обозначены значением приведенной высоты. На более ранних временах показан индекс для установки, расположенной на поверхности воды, на более поздних временах – индекс (курсивом) для установки, расположенной в середине водной толщи. Для установок, находящихся на дне

акватории, приведенная высота равна нулю – индекс не приводится. Эта величина возрастает при подъеме установки над дном и уменьшается при удалении измерителя от источника, то есть при увеличении разноса.

Для осевых установок удалось показать области, в которых ВП проявляется в виде сигнала ВПГ или ВПИ и происходит переход от одного вида проявления сигнала ВП к другому. Характер проявления сигнала ВП в сигнале переходного процесса в осевой области источника определяется приведенной высотой



**Рис. 5. Изменение сигнала трансформанты  $P_1(t)$  для поляризующегося основания (земли) 15 % в зависимости от разноса и высоты установки над дном моря (землей) (длина источника – 500 м; длина разносов – 750, 1000, 1250, 1500, 1750, 2000, 2250, 2500 м; высота установки – 100, 50 и 0 м при глубине акватории 100 м)**

Пояснения к рисунку см. на рис. 2

**Fig. 5. Variations of the transform  $P_1(t)$  signal for a polarizable base (ground) is 15 % depending on installation spacing and height above the seafloor (ground) (source length is 500 m; spacing lengths – 750, 1000, 1250, 1500, 1750, 2000, 2250, 2500 m; installation height – 100, 50 and 0 m at offshore area depth of 100 m)**

See Fig. 2 for the legend

установки. Возможно выделить интервалы приведенной высоты, для которых одинаково проявление сигнала ВП. Они описаны ниже.

Если высота установки над землей, приведенная к разносу,  $\Delta h/r$  (где  $\Delta h$  – это толщина водного слоя, отделяющего установку от геологических образований, а  $r$  – расстояние между центрами источника и трехэлектродной измерительной линии) имеет значения от 0 до 0,2 (небольшая высота или большие разносы), то сигнал ВП проявляется в виде сигнала ВПГ – положительные значения трансформанты  $P_1(t)$  во время поздней стадии переходного процесса.

Если  $\Delta h/r$  имеет значения больше 0,3 (большая высота или малые разносы), то сигнал ВП проявляется в виде сигнала ВПИ – отрицательные значения трансформанты  $P_1(t)$  во время поздней стадии переходного процесса.

Если  $\Delta h/r$  имеет значения от 0,2 до 0,3, то значения трансформанты  $P_1(t)$  во время поздней стадии переходного процесса близки к нулю – можно предположить, что составляющие сигнала ВП, связанные с гальваническим и вихревым током, компенсируют друг друга. При таком положении измерителя изучение процессов ВП становится затруднительным.

### Заключение

Для условий акваторий сигнал ВП, связанный с гальваническим и вихревым током, двояко проявляется в сигнале переходного

процесса, в значениях второй конечной разности сигнала переходного процесса и их трансформанте. Ранее при практических измерениях проявление ВПИ рассматривалось как проявление помех, но этот сигнал моделируемый и его можно рассматривать как информацию о ВП. В зависимости от высоты установки, приведенной к разносу,  $\Delta h/r$  сигнал ВП в трансформанте  $P_1(t)$  может проявляться в виде как восходящей ветви на поздних временах, так и нисходящей ветви, переходящей в отрицательные значения  $P_1$ . Для определенной высоты установки над землей и разносов сигналы ВПИ и ВПГ могут компенсировать друг друга. Такое положение измерителя можно назвать неоптимальным для изучения ВП.

Вид проявления ВП в сигнале переходного процесса (проявление ВП в виде сигнала ВПГ или ВПИ) определяется величиной  $\Delta h/r$ . Если  $\Delta h/r$  имеет значения от 0 до 0,2 (небольшая высота или большие разносы), то сигнал ВП проявляется в виде сигнала ВПГ – положительные значения трансформанты  $P_1(t)$  во время поздней стадии переходного процесса. Если  $\Delta h/r$  имеет значения больше 0,3 (большая высота или малые разносы), то сигнал ВП проявляется в виде сигнала ВПИ – отрицательные значения трансформанты  $P_1(t)$  во время поздней стадии переходного процесса. Если  $\Delta h/r$  имеет значения от 0,2 до 0,3, то значения трансформанты  $P_1(t)$  во время поздней стадии переходного процесса близки к нулю.



Таким образом, можно заключить, что значением высоты установки над землей, приведенной к разному,  $\Delta h/r$  можно прогнозировать

вид проявления сигнала ВП в сигнале переходного процесса.

#### Список источников

1. Конторович А. Э., Эпов М. И., Бурштейн Л. М., Каминский В. Д., Курчиков А. Р., Малышев Н. А. [и др.]. Геология, ресурсы углеводородов шельфов арктических морей России и перспективы их освоения // Геология и геофизика. 2010. Т. 51. № 1. С. 7–17.
2. Каминский В. Д., Супруненко О. И., Суслова В. В. Континентальный шельф российской Арктики: состояние изучения и освоения нефтегазовых ресурсов // Геология и геофизика. 2011. Т. 52. № 8. С. 977–985.
3. Уэйт Дж. Р. Геоэлектромagnetизм: пер. с англ. М.: Недра, 1987. 235 с.
4. Легейдо П. Ю., Мандельбаум М. М., Рыхлинский Н. И. Дифференциально-нормированный метод электроразведки при прямых поисках залежей углеводородов // Геофизика. 1995. № 4. С. 42–45.
5. Легейдо П. Ю., Мандельбаум М. М., Рыхлинский Н. И. Информативность дифференциальных методов электроразведки при изучении поляризующихся сред // Геофизика. 1997. № 3. С. 49–56.
6. Ageenkov E. V., Davydenko Yu. A., Fomitskii V. A. Influence of the off-axis position of the transmitter and receiver circuits on the results of differentially normalized electromagnetic sounding // Russian Geology and Geophysics. 2012. Vol. 53. Iss. 1. P. 116–121. <https://doi.org/10.1016/j.rgg.2011.12.009>.
7. Богданов А. Г., Кобзарев Г. Ю., Делия С. В., Зеленцов В. В., Иванов С. А., Легейдо П. Ю. [и др.]. Опыт применения и геологические результаты работ дифференциальным нормированным методом электроразведки на российской акватории Каспийского моря // Геофизика. 2004. № 5. С. 38–41.
8. Колесов В. В., Вовк В. С., Дзюбло А. Д., Кудрявцева Е. О. Разведка и обустройство месторождений в прибрежной зоне Обской губы // Газовая промышленность. 2008. № 12. С. 66–68.
9. Veeken P., Legeydo P., Pesterev I., Davidenko Y., Kudryavceva E., Ivanov S. Geoelectric modelling with separation between electromagnetic and induced polarization field components // First Break. 2009. Vol. 27. Iss. 12. P. 53–64. <https://doi.org/10.3997/1365-2397.2009020>.
10. Veeken P., Legeydo P., Davidenko Y., Kudryavceva E., Ivanov S., Chuvaev A. Benefits of the induced polarization geoelectric method to hydrocarbon exploration // Geophysics. 2009. Vol. 74. Iss. 2. P. 47–59. <https://doi.org/10.1190/1.3076607>.
11. Марков С. Ю., Горбачев С. В., Иванов С. А., Мятчин О. М., Нурмухамедов Т. В., Смилицев Н. П. [и др.]. Повышение надежности прогноза углеводородов на шельфе Печорского моря по результатам переинтерпретации электроразведочных работ в комплексе с сейсморазведочными данными // Геофизика. 2021. № 3. С. 25–33.
12. Ситников А. А., Агеенков Е. В., Иванов С. А., Жуган П. П., Мальцев С. Х. Аппаратура, устройства и системы наблюдений для решения нефтегазописковых и инженерно-геологических задач на акваториях электроразведочными методами ДНМЭ и НДЭМЗ // Приборы и системы разведочной геофизики. 2017. Т. 60. № 2. С. 42–49.
13. Ageenkov E. V., Sitnikov A. A., Pesterev I. Yu., Popkov A. V. Manifestation of induction and induced polarization in the case of axial and symmetrical electrical arrays // Russian Geology and Geophysics. 2020. Vol. 61. № 7. P. 795–808. <https://doi.org/10.15372/RGG2019151>.
14. Моисеев В. С. Метод вызванной поляризации при поисках нефтеперспективных площадей. Новосибирск: Наука, 2002. 136 с.
15. Kozhevnikov N. O. Fast-decaying inductive IP in frozen ground // Russian Geology and Geophysics. 2012. Vol. 53. Iss. 4. P. 406–415. <https://doi.org/10.1016/j.rgg.2012.02.013>.
16. Kamenetsky F. M., Trigubovich G. M., Chernyshev A. V. Three lectures on geological medium induced polarization. Munich: Vela Verlag, 2014. 58 p.
17. Lee T. Transient electromagnetic response of a polarizable ground // Geophysics. 1981. Vol. 46. Iss. 7. P. 1037–1041. <https://doi.org/10.1190/1.1441241>.
18. Pelton W. H., Ward S. H., Hallof P. G., Sill W. R., Nelson P. H. Mineral discrimination and removal of inductive coupling with multi-frequency IP // Geophysics. 1978. Vol. 43. Iss. 3. P. 588–609. <https://doi.org/10.1190/1.1440839>.
19. Губатенко В. П. Эффект Максвелла – Вагнера в электроразведке // Физика Земли. 1991. № 4. С. 88–98.
20. Петров А. А. Возможности метода становления электрического поля при поисках углеводородов в шельфовых зонах // Геофизика. 2000. № 5. С. 21–26.

#### References

1. Kontorovich A. E., Eпов M. I., Burshtein L. M., Kaminskii V. D., Kurchikov A. R., Malyshev N. A., et al. Geology and hydrocarbon resources of the continental shelf in Russian Arctic seas and the prospects of their development. *Geologiya i geofizika*. 2010;51(1):7-17. (In Russ.).
2. Kaminskii V. D., Suprunenko O. I., Suslova V. V. The continental shelf of the Russian Arctic region: the state of the art in the study and exploration of oil and gas resources. *Geologiya i geofizika*. 2011;52(8):977-985. (In Russ.).
3. Wait J. R. Geo-electromagnetism. 1982. 235 p. (Russ. ed.: *Geoelektromagnetizm*. Moscow: Nedra, 1987. 235 p.).
4. Legeydo P. Yu., Mandel'baum M. M., Rykhlin'skii N. I. Differential-normalized electrical survey in direct HC exploration. *Geofizika = Russian Geophysics*. 1995;4:42-45. (In Russ.).





5. Legeido P. Yu., Mandel'baum M. M., Rykhlin'skii N. I. Self-descriptiveness of differential methods of electrical survey in the exploration of polarizable media. *Geofizika = Russian Geophysics*. 1997;3:49-56. (In Russ.).

6. Ageenkov E. V., Davydenko Yu. A., Fomitskii V. A. Influence of the off-axis position of the transmitter and receiver circuits on the results of differentially normalized electromagnetic sounding. *Russian Geology and Geophysics*. 2012;53(1):116-121. <https://doi.org/10.1016/j.rgg.2011.12.009>.

7. Bogdanov A. G., Kobzarev G. Yu., Deliya S. V., Zelen'tsov V. V., Ivanov S. A., Legeido P. Yu., et al. Application experience and geological results of using the differential normalized method of electrical survey in the Russian aquatory of the Caspian Sea. *Geofizika = Russian Geophysics*. 2004;5:38-41. (In Russ.).

8. Kolesov V. V., Vovk V. S., Dzyublo A. D., Kudryavtseva E. O. Exploration and development of deposits in the Ob Bay coastal zone. *Gazovaya promyshlennost' = Gas Industry*. 2008;12:66-68. (In Russ.).

9. Veeken P., Legeydo P., Pesterev I., Davidenko Y., Kudryavtseva E., Ivanov S. Geoelectric modelling with separation between electromagnetic and induced polarization field components. *First Break*. 2009;27(12):53-64. <https://doi.org/10.3997/1365-2397.2009020>.

10. Veeken P., Legeydo P., Davidenko Y., Kudryavtseva E., Ivanov S., Chuvaev A. Benefits of the induced polarization geoelectric method to hydrocarbon exploration. *Geophysics*. 2009;74(2):47-59. <https://doi.org/10.1190/1.3076607>.

11. Markov S. Yu., Gorbachev S. V., Ivanov S. A., Myatchin O. M., Nurmukhamedov T. V., Smilevets N. P., et al. Improving the reliability of the forecast of hydrocarbons on the Pechora Sea shelf based on the results of reinterpretation of electrical exploration works in combination with

seismic data. *Geofizika = Russian Geophysics*. 2021;3:25-33. (In Russ.).

12. Sitnikov A. A., Ageenkov E. V., Ivanov S. A., Zhugan P. P., Mal'tsev S. Kh. Equipment, devices and surveying systems to solve the problems of oil and gas exploration and engineering geology in water areas with application of DNME and NDEMS electrical prospecting methods. *Pribory i sistemy razvedochnoi geofiziki*. 2017;60(2):42-49. (In Russ.).

13. Ageenkov E. V., Sitnikov A. A., Pesterev I. Yu., Popkov A. V. Manifestation of induction and induced polarization in the case of axial and symmetrical electrical arrays. *Russian Geology and Geophysics*. 2020;61(7):795-808. <https://doi.org/10.15372/RGG2019151>.

14. Moiseev V. S. *Induced polarization method for oil-bearing areas prospecting*. Novosibirsk: Nauka; 2002. 136 p. (In Russ.).

15. Kozhevnikov N. O. Fast-decaying inductive IP in frozen ground. *Russian Geology and Geophysics*. 2012;53(4):406-415. <https://doi.org/10.1016/j.rgg.2012.02.013>.

16. Kamenetsky F. M., Trigubovich G. M., Chernyshev A. V. *Three lectures on geological medium induced polarization*. Munich: Vela Verlag; 2014. 58 p.

17. Lee T. Transient electromagnetic response of a polarizable ground. *Geophysics*. 1981;46(7):1037-1041. <https://doi.org/10.1190/1.1441241>.

18. Pelton W. H., Ward S. H., Hallof P. G., Sill W. R., Nelson P. H. Mineral discrimination and removal of inductive coupling with multi-frequency IP. *Geophysics*. 1978;43(3):588-609. <https://doi.org/10.1190/1.1440839>.

19. Gubatenko V. P. Maxwell – Wagner effect in electrical prospecting. *Fizika Zemli*. 1991;4:88-98. (In Russ.).

20. Petrov A. A. Potential of the electrical transient method in hydrocarbon prospecting in the shelf zones. *Geofizika = Russian Geophysics*. 2000;5:21-26. (In Russ.).

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



**Агеенков Евгений Валерьевич,**

инженер,  
Институт нефтегазовой геологии и геофизики им. А. А. Трофимука СО РАН,  
г. Новосибирск, Россия,  
[AgeenkovEV@ipgg.sbras.ru](mailto:AgeenkovEV@ipgg.sbras.ru).

**Evgeniy V. Ageenkov,**

Engineer,  
Trofimuk Institute of Petroleum Geology and Geophysics,  
Siberian Branch of the Russian Academy of Sciences,  
Novosibirsk, Russia,  
[AgeenkovEV@ipgg.sbras.ru](mailto:AgeenkovEV@ipgg.sbras.ru).



**Ситников Александр Анатольевич,**

генеральный директор,  
ООО «Сибирская геофизическая научно-производственная компания»,  
г. Иркутск, Россия,  
[aas@dnme.ru](mailto:aas@dnme.ru).

**Aleksandr A. Sitnikov,**

CEO,  
Siberian Geophysical Research Production Company LLC,  
Irkutsk, Russia,  
[aas@dnme.ru](mailto:aas@dnme.ru).



**Воднева Елена Николаевна,**  
ведущий инженер,  
Лимнологический институт СО РАН,  
г. Иркутск, Россия,  
ven21@mail.ru.  
**Elena N. Vodneva,**  
Leading Engineer,  
Limnological Institute, Siberian Branch of the Russian Academy of Sciences,  
Irkutsk, Russia,  
ven21@mail.ru.

#### **Вклад авторов / Contribution of the authors**

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

#### **Конфликт интересов / Conflict of interests**

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

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

#### **Информация о статье / Information about the article**

Статья поступила в редакцию 02.06.2021; одобрена после рецензирования 06.07.2021; принята к публикации 10.08.2021.

The article was submitted 02.06.2021; approved after reviewing 06.07.2021; accepted for publication 10.08.2021.



Научная статья

УДК 622.271.1:622.236.52

<https://doi.org/10.21285/2686-9993-2021-44-3-312-322>

## Совершенствование комплекса средств для гравитационной переработки полиминеральных глинистых песков россыпей Приамурья

Наталья Петровна Хрунина<sup>а</sup><sup>а</sup>Институт горного дела ДВО РАН, г. Хабаровск, Россия

**Резюме.** Проблема переработки песков полиминеральных россыпных месторождений Дальневосточного региона представляет собой сложную техническую и технологическую задачу. Отмечено преобладание высокоглинистых россыпей с повышенным содержанием ценных компонентов мелких и тонких фракций, при этом содержание мелкого золота фракции размером менее 0,5 мм на некоторых объектах достигает более 90 % с преобладанием большей частью фракций размером менее 0,3 мм. Подтверждена необходимость усовершенствования технологий и технических средств для переработки высокоглинистых песков россыпей с повышенным содержанием тонкодисперсных и наноразмерных частиц ценных компонентов. В связи с этим целью данного исследования является обоснование подходов к построению феноменологической модели переработки высокоглинистых песков россыпей гравитационными методами для обеспечения сохранности кристаллов и снижения потерь ценных компонентов при сниженной энергоёмкости. На основе предложенной экспоненциальной зависимости изменения удельной межфазной поверхности минеральных частиц от термодинамического потенциала системы установлено, что определяющую роль в процессе микродезинтеграции минеральных частиц в условиях турбулизации, инициируемой падающей струей на плоскую поверхность кавитационного реактора, играет взаимозависимость скорости истечения и расхода гидросмеси в условиях увеличения времени воздействия. В результате расчетов установлен рост удельной межфазной поверхности частиц в интервалах 1,8–3,3 раза в зависимости от регулирования расхода гидросмеси, плотности гидросмеси и времени инициирования. Представленные математические зависимости позволяют управлять процессом при проведении испытаний кавитационного реактора, оценить качество и характер работы установки, а также отрегулировать и внести необходимые изменения в конструкцию. Предложена общая схема переработки россыпей с использованием ряда инновационных установок нового типа, в том числе на основе сочетания турбулентности и кавитации при низкой энергоёмкости. Воздействие на гидросмеси высокоглинистых песков гидродинамических эффектов, инициируемых турбулентными эффектами и кавитацией, способно обеспечить надежность микродезинтеграции-диспергирования, обеспечив существенное снижение технологических потерь ценных компонентов. Результаты данной работы могут быть использованы для дальнейшего развития теоретических подходов к описанию кавитационных процессов, моделируемых в предлагаемых установках.

**Ключевые слова:** высокоглинистость, полиминеральность, дезинтеграция, турбулентность, кавитация, кавитационный реактор, низкая энергоёмкость, центробежный концентратор

**Для цитирования:** Хрунина Н. П. Совершенствование комплекса средств для гравитационной переработки полиминеральных глинистых песков россыпей Приамурья // Науки о Земле и недропользование. 2021. Т. 44. № 3. С. 312–322. <https://doi.org/10.21285/2686-9993-2021-44-3-312-322>.

Original article

## Improving the complex of technical facilities for gravitational processing of polymineral clay sands of Amur river basin placers

Natalia P. Khrunina<sup>а</sup><sup>а</sup>Mining Institute, Far Eastern Branch of the Russian Academy of Sciences, Khabarovsk Russia

**Abstract.** The problem of processing sands from polymineral placer deposits of the Far Eastern region is a complex technical and technological process. The predominance of high-clay placers with high content of valuable components of small and thin fractions is noted. At the same time the content of fine gold fractions smaller than 0.5 mm reach more than 90 % at some sites with the predominance of fractions smaller than 0.3 mm. The necessity to improve the technologies

© Хрунина Н. П.. 2021



and technical facilities for processing placer high-clay sands with a high content of fine and nanoscale particles of valuable components is substantiated. Therefore, the purpose of the study is to substantiate approaches to the construction of a phenomenological model for processing of placer high-clay sands by gravitational methods to ensure safety of crystals and reduce the loss of valuable components with reduced energy intensity. On the basis of the proposed exponential dependence of variation of specific interfacial surface of mineral particles on system thermodynamic potential, it has been found out that interdependence of hydraulic fluid efflux and flow rates plays a decisive role in microdesintegration of mineral particles under conditions of turbulization initiated by the jet falling on the flat surface of the cavitation reactor. The calculations performed allowed to estimate the growth of the specific interfacial surface of particles in the intervals of 1.8–3.3 times depending on regulation of hydraulic fluid flow rate, its density and initiation time. Presented mathematical dependencies will allow to control the process when testing cavitation reactor, assess installation quality and operation nature, as well as adjust the design and introduce necessary changes. We propose a general processing scheme for placers with the use of a number of innovative installations of a new type including those based on the combination of turbulence and cavitation at low energy intensity. The impact of hydrodynamic effects initiated by turbulent effects and cavitation on hydraulic fluid of high-clay sands is able to ensure reliable microdesintegration-dispersion and provide a significant reduction in technological losses of valuable components. The study results obtained can be used for further development of theoretical approaches to the description of cavitation processes modeled in proposed installations.

**Keywords:** high content of clay, polyminerality, disintegration, turbulence, cavitation, cavitation reactor, low energy intensity, centrifugal concentrator

**For citation:** Khrunina N. P. Improving the complex of technical facilities for gravitational processing of polymineral clay sands of Amur river basin placers. *Nauki o Zemle i nedropol'zovanie = Earth sciences and subsoil use*. 2021;44(3):312-322. (In Russ.). <https://doi.org/10.21285/2686-9993-2021-44-3-312-322>.

## Введение

В настоящее время значительную часть аллювиальных природных и техногенных полиминеральных месторождений Дальневосточного региона составляют глинистые и высокоглинистые россыпи, в которых большую долю занимает содержание тонкодисперсного и наноразмерного золота. На некоторых участках объектов месторождений Колчан, Каменистый, Кедровка, Рокосуевский, Ангочикан, Кайгачан, Благодатный-Майнура, Майский, Антуанской площади южной части Хабаровского края содержание мелкого золота фракции размером менее 0,5 мм достигает более 90 % с преобладанием большей частью фракций размером менее 0,3 мм. Также, согласно данным геологических исследований, золотоносные россыпи Дальнего Востока России содержат в некоторых случаях до 90 % глинистой фракции. В настоящее время потери мелкого и тонкого золота в процессе эксплуатации высокоглинистых россыпей порой достигают 80 % [1, 2]. Обоснована возможность совместной переработки золотосодержащих руд и техногенных отходов россыпной золотодобычи: это дает возможность рассматривать в комплексе минерально-сырьевые базы как запасы единого месторождения. Данный подход обеспечивает снижение

удельных капитальных вложений и эксплуатационных затрат за счет увеличения производственной мощности предприятия. Использование несовершенных технологий дражной и гидравлической разработки золотоносных песков приводит к значительным потерям мелкого, тонкого золота и золота в сростках<sup>1</sup> [3, 4]. Основополагающим экологически чистым и рентабельным направлением развития технологий может стать процесс, способный осуществить микродезинтеграцию высокоглинистых песков гравитационным способом с наименьшими энергетическими затратами.

В уплотненной высокоглинистой среде частицы песков и минеральных компонентов имеют достаточно прочные структурные связи. Ряд работ посвящен текущему состоянию и перспективам развития технологий извлечения золота с использованием активированного углерода [5], исследованию распада замороженных пород под воздействием химических полей и водной среды [6], выщелачиванию золота хлором [7], интенсивному цианированию золота из гравитационных концентратов в аппаратах барабанного типа [8]. Использование активированного углерода может иметь место в силу своих нейтральных воздействий на окружающую среду, но при использовании выщелачивающих растворов

<sup>1</sup> Фролов Ю. Г. Курс коллоидной химии. Поверхностные явления и дисперсные системы: учебник для студентов вузов. М.: Химия, 1982. 399 с.



и других активных реагентов необходим учет экологических аспектов воздействия химических компонентов. В настоящее время развиваются исследования по усовершенствованию экологически более безопасных гравитационных методов переработки [9, 10]. Из-за отрицательного влияния на технологический процесс окатышей глины, образующихся на наклонных грохотах с круговой амплитудой колебаний, а также процесса окомкования при применении скруббер-бутар для более полноценной работы комплекса рекомендовано использовать два двухдечных промывочных горизонтальных грохота с линейной амплитудой колебаний. Также для частичного устранения данных недостатков предложена установка Haver Hydro-Clean, предназначенная для отделения глинистых агрегатов от кристаллической части минерального сырья путем их дезинтеграции с промывкой под высоким давлением воды [11]. К недостаткам данной конструкции можно отнести сложность изготовления и эксплуатации, а также дополнительное энергопотребление, затрачиваемое на вращение ротора и дополнительную подачу воды. Кроме того, применение данной конструкции на объектах с преимущественно тонкодисперсными частицами ценных компонентов не обеспечит снижение их потерь. Анализ работы барабанных дезинтеграторов и гидравлических центробежных дезинтеграторов, которые являются наиболее известными новейшими и испытанными в производственных условиях конструкциями, показывает, что данные установки применимы для предварительной дезинтеграции глинистых песков [12]. К недостаткам их эксплуатации можно отнести неизбежное окомковывание с образованием глинистых окатышей при повышенном содержании глины в песках. Однако надо отметить, что тангенциальный и противоточный принцип подачи пульпы в гидравлические центробежные дезинтеграторы, а также использование кавитирующих элементов на внутренней поверхности при определенной доработке позволяют надеяться на существенное достижение необходимого эффекта при использо-

вании на высокоглинистых россыпях. Развиваются нетрадиционные высокоэнергетические методы исследования дезинтеграции и вскрытия тонкодисперсных минеральных комплексов на основе излучающих систем, в том числе ультразвуковых [13, 14]. Тем не менее данные технологии в сильной степени энергозатратны и пока не находят широкого применения в производстве. Известны исследования обогатимости материала, полученного посредством технологии, включающей три последовательно чередующиеся стадии измельчения и гравитации при помощи центробежного концентратора, которая подтвердила эффективность извлечения наноразмерного золота гравитационным способом [15]. Ряд исследований подтверждает комплексное использование гравитационных методов измельчения и центробежной классификации с использованием аппарата Knelson и других<sup>2</sup> [16, 17]. В работах [18–23] отмечаются достижения в области развития технологий гравитационного извлечения золота и описываются пути развития процессов переработки полезных ископаемых посредством прогнозирования и практической доработки с использованием стандартизированного теста. Общий недостаток представленных разработок заключается в сравнительно низкой эффективности процесса при переработке глинистых песков россыпей с повышенным содержанием тонкодисперсных и наноразмерных частиц ценных компонентов и высокой энергоемкости. Важным фактором при дезинтеграции песков рудно-россыпных месторождений также является недопустимость переизмельчения для обеспечения сохранности кристаллической структуры ценных компонентов. В работе [24] предлагается схема переработки с увеличенным числом стадий измельчения и классификации при небольших энергиях измельчения. Предложена комбинированная схема переработки сырья, включающая механоактивационное измельчение в процессе гидрохимической доводки.

Анализ функциональных особенностей известных решений подтвердил необходимость

<sup>2</sup> Knelson™ semi-continuous gravity concentrator // Flsmidth.com. [Электронный ресурс]. URL: <https://www.flsmidth.com/en-gb/products/precious-metals-recovery/knelson-semi-continuous-gravity-concentrator>. (16.05.2021).





усовершенствования технологий и технических средств для переработки высокоглинистых песков россыпей с повышенным содержанием тонкодисперсных и наноразмерных частиц ценных компонентов. Фенологическим путем определено «узкое» место в процессах переработки – это недостаточная эффективность микродезинтеграции глинистых песков россыпных и рудно-россыпных месторождений. В связи с этим целью представленного исследования является обоснование подходов к построению феноменологической модели переработки высокоглинистых песков россыпей гравитационными методами для обеспечения сохранности кристаллов и уменьшения потерь ценных компонентов при сниженной энергоемкости.

### **Материалы и методы исследований**

Одним из главных аспектов обоснования подходов построения феноменологической модели процесса микродезинтеграции является рассмотрение описаний и методик расчета дезинтеграции минеральных компонентов в жидкой среде с щадящим воздействием, инициирующем эффекты влияния на микроуровне. Исследования дезинтеграции песков с повышенным содержанием глиен лежат в области происходящих физико-механических, физико-химических и гидродинамических явлений при взаимодействии рабочих органов или активирующих растворов с породной массой. К ним относятся разнообразные эффекты понижения прочности вследствие влияния поверхностно-активной среды, инициирующей понижение удельной свободной поверхностной энергии твердого тела. В работе [25] указывается на расширение применения гидравлического, термического и комбинированных способов, а также на прохождение стадии экспериментальных исследований и промышленных испытаний электрофизических и химических способов разрушения. Дается обобщение законов Кирпичева – Кика и Риттингера, в соответствии с которыми общие энергозатраты складываются из упругопластических деформаций разрушаемого объема материала и работы, расходуемой на образование новых поверхностей. В работе [26]

рассмотрены гипотезы измельчения также с учетом пропорциональности энергии измельчения по отношению к вновь образованной поверхности и объему измельченного материала. Учитывается кинетика и длительность процесса. Известны работы, связанные с обобщением математических моделей гидродинамических и кавитационных явлений посредством электроразрядных и ультразвуковых воздействий [27, 28], влияния конструктивных особенностей вращающихся каналов типа «конфузор-диффузор» [29]. В работе [30] предложена приближенная модель вихревого потока, инициируемого воздействием газообразного продукта, завихрителей и стержней. Установлено, что энергия вихревого потока пропорциональна расходу потока, разности давлений на входе и выходе устройства.

### **Результаты исследований и их обсуждение**

Анализ показал, что основными разрушающими эффектами при микродезинтеграции минеральной составляющей гидросмесей являются турбулентное резонансное возбуждение и кавитация, приводящие к деструкции дисперсно-агрегатного состояния гидросмеси и разрушению механических связей твердого. Кроме того, эти явления можно инициировать посредством технических средств, не прибегая к дополнительным затратам электроэнергии. Феноменологический подход включает два этапа математического описания процессов, в полном цикле обеспечивающих достаточную деструкцию глинистых частиц посредством турбулизации и последующей кавитации. В данной статье ограничимся рассмотрением процессов турбулизации для выбора исходных параметров регулирования процесса в начале цикла обработки гидросмеси в установке с целью обеспечения ее эффективности. При попадании струи гидросмеси на ровную поверхность, расположенную перпендикулярно падающей струе гидросмеси, давление струи на поверхность  $P$  будет зависеть от равновесной плотности гидросмеси  $\rho_3$ , расхода гидросмеси  $Q$ , скорости струи  $V$  и определится по формуле

$$P = \rho_3 \cdot Q \cdot V. \quad (1)$$



Равновесная плотность определяется с учетом объемного содержания в гидросмеси твердого и воды. Расход гидросмеси задается, а скорость струи определяется в зависимости от расхода и диаметра входного сечения сопла  $d_{вх}$  по формуле

$$V = \frac{4Q}{\pi \cdot d_{вх}^2}. \quad (2)$$

Имея предварительную схему конструктивного выполнения установки, осуществляем моделирование математической модели турбулентного эффекта, происходящего при подаче струи гидросмеси в закрытую емкость 1 (рис. 1). Турбулентность будет достигаться посредством гидродинамической составляющей струи 2 и формы поверхности 3, на которую она падает в установке на первом этапе.

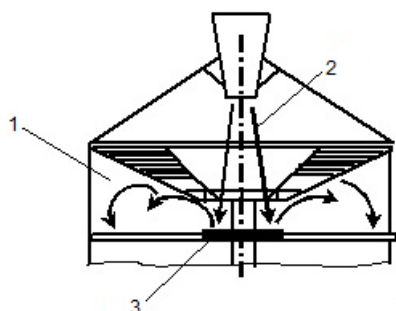


Рис. 1. Схема турбулизации струи на первой ступени генератора  
Fig. 1. Diagram of jet turbulization at generator's first stage

В рассматриваемой среде происходит изменение агрегатного состояния веществ, преимущественное количество которых находится в конденсированном состоянии и небольшое количество – в газообразном, поэтому различия между изменениями внутренней энергии частиц и изменениями энтропии системы этих частиц незначительны. Для определения параметров процесса, происходящего в кавитационном реакторе, используем зависимость, включающую оценку изменения дезинтегрируемой твердой составляющей гидросмеси. Зависимость изменения удельной межфазной поверхности вновь образованных частиц в результате турбулизации, возникшей при попадании потока гидросмеси на поверхность 3 (см. рис. 1), можно представить по аналогии [2] в виде уравнения

$$dS_{уд} = dS_{уд} \cdot e^{E \cdot \sigma^{-1}}, \quad (3)$$

где  $S_{уд}$  – площадь начальной удельной межфазной поверхности частиц,  $m^{-1}$ ;  $E$  – термодинамический потенциал системы;  $\sigma$  – удельная поверхностная энергия частиц, равная  $0,0795 \text{ кг/м}^2$ .

Изменение термодинамического потенциала системы выражается зависимостью

$$dE = W \cdot \eta dt, \quad (4)$$

где  $W$  – мощность энергии потока гидросмеси;  $\eta$  – коэффициент полезного действия установки, принимаемый за 0,5;  $t$  – время воздействия потока минеральной гидросмеси при падении на поверхность турбулизации.

Мощность энергии потока гидросмеси  $W$ , воздействующего на поверхность турбулизации (см. рис. 1, поз. 3), можно выразить через давление потока гидросмеси  $P$  и площадь поверхности турбулизации  $S_m$  прямо пропорциональной зависимостью

$$W = P \cdot S_m. \quad (5)$$

Часть струи веерообразно расходится, отражаясь затем от стенок корпуса и элементов, расположенных выше уровня поверхности (см. рис. 1, поз. 3), падает вниз, попадая на заостренные выступы вертикальных пластинчатых кавитационных элементов. Изменения удельной межфазной поверхности частиц твердого контролируются с помощью установки Analysette 22 перед подачей гидросмеси и после прохождения потока через реактор. Диапазон измеряемых частиц составляет от 0,08 до 2000 мкм. Представленные математические зависимости позволяют управлять процессом при проведении испытаний, оценить качество и характер работы установки, а также отрегулировать и внести необходимые изменения в конструкцию.

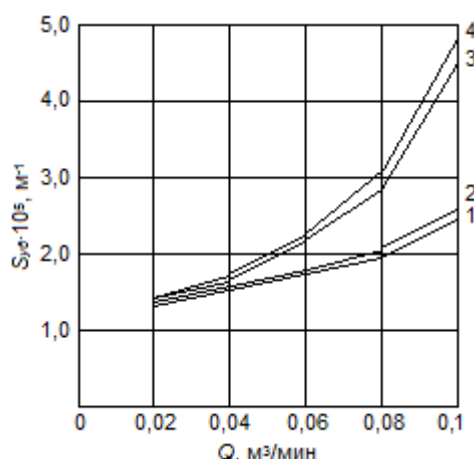
Рассмотрим пример расчета удельной межфазной поверхности минеральных частиц в результате турбулизации потока гидросмеси на первой ступени при попадании в реактор микродезинтеграции. Изменяющиеся исходные параметры: время воздействия – 2 и 4 с; при равновесной плотности гидросмеси в первом случае – 0,1 твердого и 0,9 воды, расчетная плотность гидросмеси составит величину  $1076,3 \text{ кг/м}^3$ ; во втором случае – 0,2 твердого и 0,8 воды, расчетная плотность гидросмеси –  $1152,6 \text{ кг/м}^3$ . Коэффициент полезного действия установки  $\eta$  принимаем равным 0,5.



Удельная поверхностная энергия частиц  $\sigma$  равна  $0,0795 \text{ кг/м}^2$ . Площадь поверхности турбулизации  $S_m$  при радиусе, равном  $0,1 \text{ м}$ , составит

$$S_m = \pi R^2 = 3,14 \cdot 0,1 = 0,0314 \text{ м}^2. \quad (6)$$

Исходную удельную межфазную поверхность минеральных частиц принимаем равной  $S_{0\gamma\delta} = 1,345 \cdot 10^5 \text{ м}^{-1}$ . Диаметр входного сечения сопла  $d_{\text{вх}}$  принимаем равным  $0,05 \text{ м}$ . Диапазон изменения расхода гидросмеси  $Q$  принимаем равным от  $0,02$  до  $0,1 \text{ м}^3/\text{мин}$  или от  $0,00033$  до  $0,00167 \text{ м}^3/\text{с}$ . На рис. 2 представлена зависимость удельной межфазной поверхности минеральных частиц  $S_{\gamma\delta}$  от расхода гидросмеси  $Q$ , полученная расчетом по теоретической формуле (3).



**Рис. 2. Зависимость удельной межфазной поверхности минеральных частиц от расхода гидросмеси**

**Fig. 2. Dependence of specific interfacial surface of mineral particles on hydraulic fluid flow rate**

Графики 1 и 2 (см. рис. 2) получены расчетом с исходными данными: время воздействия –  $2 \text{ с}$ , расчетная плотность гидросмеси –  $1076,3 \text{ кг/м}^3$  для графика 1 и  $1152,6 \text{ кг/м}^3$  для графика 2. Графики 3 и 4 получены при тех же данных и времени воздействия  $4 \text{ с}$ . Существенную роль играет временной фактор и содержание твердой составляющей – минеральных частиц – в жидкой фазе. Результаты теоретических расчетов показали, что при времени воздействия  $2 \text{ с}$  удельная межфазная поверхность частиц увеличивается в среднем в  $1,8$  раза в зависимости от плотности гидросмеси. При времени воздействия  $4 \text{ с}$  удельная межфазная поверхность частиц увеличивается в среднем в  $3,3$  раза в зависи-

мости от плотности гидросмеси. Определяющую роль в процессе микродезинтеграции минеральных частиц в условиях турбулизации играет рост времени воздействия с учетом термодинамического потенциала системы, зависящего от расхода гидросмеси  $Q$ , скорости струи  $V$  и давления струи на поверхность.

Для реализации поставленной цели рассмотрены конструктивные особенности нового технического решения, расширяющего функциональные возможности оборудования с использованием турбулизующего реактора с элементами кавитации [31]. Начальный этап работы включает компоновку элементов геотехнологического комплекса для подготовки размыва глинистых песков в забое (рис. 3, 4). Решение вопроса повышения производительности и технологической эффективности возможно за счет применения установки эстакадного типа [32] для охвата больших по площади размеров полигона.

Комплекс [32] включает средства для осуществления размыва песков, первичной дезинтеграции и классификации в массиве посредством гидромонитора и установки эстакадного типа, оснащенной двухковшовым модулем. Подготовленные глинистые пески подаются последовательно на автоматическую установку гравитационного обогащения [33] и тонкослойный двухуровневый шлюз (см. рис. 3). Автоматическая установка гравитационного обогащения [33] оснащена многоярусной улавливающей поверхностью, каждый ярус которой оснащен многорядными элементами, расширяющими общую площадь улавливания концентрата, а также датчиками контроля накопления концентрата и автоматизированным сполоском. Хвосты подаются последовательно на первую стадию микродезинтеграции посредством кавитационных реакторов [31] и затем на стадию гравитационного обогащения посредством центробежных концентраторов. При необходимости стадии микродезинтеграции и центробежного разделения фракций повторяются до полного извлечения ценных компонентов. Реактор [31] оснащен диффузором, на выходе которого жестко зафиксирован гидродинамический распределитель-турбулизатор потока 1 в виде многогранной частично перфорированной поверхности,



ниже основания которой установлена плоская поверхность 4 крестовины для турбулизации и кавитационные элементы 2. Через распределитель-турбулизатор 1 поток подается на

плоскую поверхность 4 крестовины и распределяется в промежутках вдоль поверхностей вертикальных пластинчатых кавитационных элементов 2 (см. рис. 4).

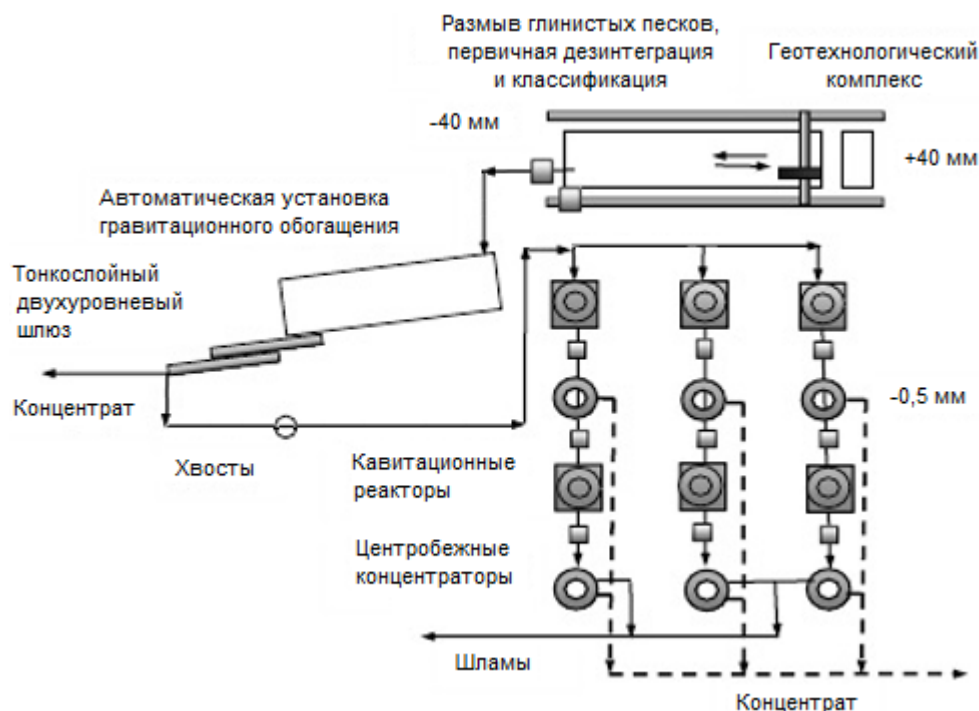


Рис. 3. Схема работы геотехнологического комплекса

Fig. 3. Operation scheme of a geotechnological complex

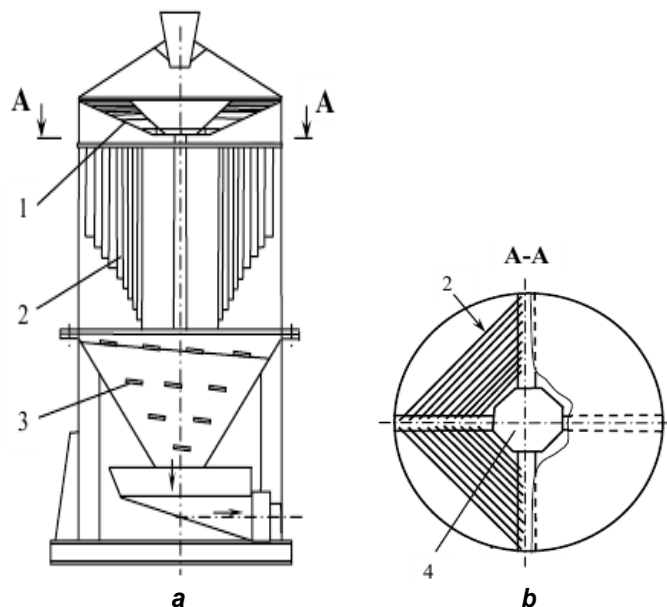


Рис. 4. Кавитационный реактор для микродезинтеграции:

а – общий вид реактора; б – разрез А-А на фигуре (а),

вид сверху на вертикальные пластинчатые кавитационные элементы

1 – распределитель-турбулизатор потока; 2 – вертикальные пластинчатые кавитационные элементы;

3 – кавитационные порошки установлены по спирали в зоне конфузора; 4 – плоская поверхность турбулизации

Fig. 4. Cavitation reactor for microdesintegration:

а – general view of reactor; б – A-A section on the figure (a), top view of vertical plate cavitation elements

1 – flow distributor and turbulizer; 2 – vertical plate cavitation elements;

3 – cavitation horns installed in a spiral in the confusor zone; 4 – flat turbulization surface



Известные широко применяемые технологии имеют коэффициент извлечения ценных компонентов 0,6–0,75, предлагаемая же технология существенно влияет на извлечение мелких фракций ценных компонентов и обеспечивает коэффициент извлечения до 0,85. По укрупненным оценкам экономическая эффективность предлагаемой технологии по сравнению с известными технологиями на основе гравитационных методов извлечения ценных компонентов эффективнее в 3–5 раз. Использование установок, работа которых основана на новом принципе формирования турбулизации и кавитационных явлений в гидротоке, обеспечит эффективное разрушение минеральной составляющей при низкой энергоемкости, которая определяется отсутствием вращающихся элементов внутри корпуса кавитационных реакторов. Установка обеспечит и высокую экологическую эффективность путем снижения использования токсичных растворов для выщелачивания.

### Заключение

На основе предложенной экспоненциальной зависимости изменения удельной межфазной поверхности минеральных частиц от

термодинамического потенциала системы установлено, что определяющее влияние в процессе микродезинтеграции минеральных частиц в условиях турбулизации, инициируемой падающей струей на плоскую поверхность кавитационного реактора, имеет взаимозависимость скорости истечения и расхода гидросмеси в условиях увеличения времени воздействия. В результате расчетов установлен рост удельной межфазной поверхности частиц в среднем от 1,8 до 3,3 раза в зависимости от регулирования расхода гидросмеси, плотности гидросмеси и времени воздействия. Представленные математические зависимости позволяют управлять процессом при проведении испытаний кавитационного реактора, оценить качество и характер работы установки, а также отрегулировать и внести необходимые изменения в конструкцию. Результаты, полученные в данной работе, могут быть использованы для дальнейшего развития теоретических подходов к описанию кавитационных процессов, моделируемых в предлагаемых установках, новизна которых подтверждена патентами [2, 31–33]. Данные исследования требуют также и своего развития.

### Список источников

1. Неронский Г. И., Бородавкин С. И. Метод оценки содержаний золота в россыпях с доминирующими мелкими и тонкими его выделениями // Золотодобыча: рекламно-информационный бюллетень. 2012. № 1. С. 21–24.
2. Хрунина Н. П., Стратечук О. В. Новые аспекты научных и технологических основ гидродинамической микродезинтеграции при освоении высокоглинистых золотосодержащих месторождений Дальневосточного региона / под ред. А. М. Пуляевского. Хабаровск: Изд-во ТОГУ, 2018. 155 с.
3. Маньков В. М., Сержанин П. В. Разработка и испытание способа и аппарата для эффективной дезинтеграции и классификации валунистых глинистых руд и песков // Золотодобыча: рекламно-информационный бюллетень. 2019. № 11. С. 18–20.
4. Кисляков В. Е., Никитин А. В. Подготовка глинистых песков россыпных месторождений к дезинтеграции управляемым водонасыщением // Горный журнал. 2010. № 2. С. 28–30.
5. Ёлшин В. В., Мельник С. А. Современное состояние и перспективы развития технологии десорбции золота из насыщенных активированных углей // Austrian Journal of Technical and Natural Sciences. 2014. Iss. 9-10. P. 114–118.
6. Рукович А. В., Рочев В. Ф. Дезинтеграция мерзлых глинистых пород под воздействием химических полей и водной среды // Успехи современного естествознания. 2017. № 5. С. 123–127.
7. De Michelis I., Olivieri A., Ubaldini S., Ferella F., Beolchini F., Vegliò F. Roasting and chlorine leaching of gold-bearing refractory concentrate: experimental and process analysis // International Journal of Mining Science and Technology. 2013. Vol. 23. Iss. 5. P. 709–715. <https://doi.org/10.1016/j.ijmst.2013.08.015>.
8. Surimbayev B., Bolotova L., Mishra B., Baikonurova A. Intensive cyanidation of gold from gravity concentrates in a drum-type apparatus // Қазақстан Республикасы Ұлттық академиясының Хабарлары. Геология және техника ғылымы сериясы. 2018. № 5. С. 32–37. <https://doi.org/10.32014/2018.2518-170X.7>.
9. Крупская Л. Т., Мамаев Ю. А., Хрунина Н. П., Литвинцев В. С., Пономарчук Г. П. Экологические основы рационального землепользования при освоении россыпных месторождений Дальнего Востока. Владивосток – Хабаровск: Дальнаука, 1997. 76 с.
10. Патент № 2187373, Российская Федерация, МПК В03В5/74 В03В5/04. Многоуровневая установка для извлечения ценных минералов / Н. П. Хрунина,





Ю. А. Мамаев, О. В. Стратечук, Т. О. Хрунин. Заявл. 30.01.2001; опубл. 20.08.2002.

11. Златев М., Коломиетц А. Hydro-Clean: извлекать больше золота из упорных руд возможно // Глобус. 2021. № 1. С. 170–179.

12. Кочнев В. Г., Грушинская О. В. Дезинтеграция труднопромывистых песков с высокопластичной глиной // Золотодобыча: рекламно-информационный бюллетень. 2021. № 2. С. 22–26.

13. Чантурия В. А., Бунин И. Ж. Нетрадиционные высокэнергетические методы дезинтеграции и вскрытия тонкодисперсных минеральных комплексов // Физико-технические проблемы разработки полезных ископаемых. 2007. № 3. С. 107–128.

14. Мамаев Ю. А., Хрунина Н. П. Определение оптимальных начальных параметров звукового воздействия на пульпу в зумпфовом накопителе при открытой разработке высокоглинистых россыпей // Горный информационно-аналитический бюллетень. 2009. № 7. С. 187–191.

15. Coulter T., Subasinghe G. K. N. A mechanistic approach to modelling Knelson concentrators // Minerals Engineering. 2005. Vol. 18. Iss. 1. P. 9–17. <https://doi.org/10.1016/j.mineng.2004.06.035>.

16. Sakuhuni G., Altun N. E., Klein B., Tong L. A novel laboratory procedure for predicting continuous centrifugal gravity concentration applications: the gravity release analysis // International Journal of Mineral Processing. 2016. Vol. 154. P. 66–74. <https://doi.org/10.1016/j.minpro.2016.07.004>.

17. Ghaffari A., Farzanegan A. An investigation on laboratory Knelson Concentrator separation performance: part 1: retained mass modelling // Minerals Engineering. 2017. Vol. 112. P. 57–67. <https://doi.org/10.1016/j.mineng.2017.07.006>.

18. Noaparast M., Laplante A. R. Free gold particles selection and breakage functions estimation // Iranian Journal of Science and Technology. Transaction B: Engineering. 2004. Vol. 28. Iss. 6. P. 667–677.

19. Fullam M., Watson B., Laplante A., Gray S. Advances in gravity gold technology // Gold ore processing: project development and operations / ed. M. D. Adams. Amsterdam: Elsevier, 2016. P. 301–314.

20. Laplante A., Gray S. Advances in gravity gold technology // Developments in Mineral Processing. 2005. Vol. 15. P. 280–307. [https://doi.org/10.1016/S0167-4528\(05\)15013-3](https://doi.org/10.1016/S0167-4528(05)15013-3).

21. Koppalkar S., Bouajila A., Gagnon C., Noel G. Understanding the discrepancy between prediction and plant GRG recovery for improving the gold gravity performance // Minerals Engineering. 2011. Vol. 24. Iss. 6. P. 559–564. <https://doi.org/10.1016/j.mineng.2010.09.007>.

22. Laplante A. R. A standardized test to determine gravity recoverable gold. [Электронный ресурс]. URL: <https://www.911metallurgist.com/blog/wp-content/uploads/2015/10/Test-Determine-How-Much-Gravity-Recoverable-Gold.pdf>. (16.05.2021).

23. Laplante A. R., Dunne R. C. The Gravity recoverable gold test and flash flotation // Proceeding 34<sup>th</sup> Annual

Meeting of the Canadian Mineral Processors. Ottawa, 2002. [Электронный ресурс]. URL: <http://seprosystems.com/language/wp-content/uploads/2016/09/laplante.pdf>. (16.05.2021).

24. Уракаев Ф. Х., Шумская Л. Г., Кириллова Е. А., Кондратьев С. А. Возможности стадийной дезинтеграции и механической активации в процессах обогащения техногенного оловосодержащего сырья // Физико-технические проблемы разработки полезных ископаемых. 2021. № 3. С. 158–167. <https://doi.org/10.15372/FTPRPI20210315>.

25. Лабутин В. Н., Маттис А. Р., Зайцев Г. Д., Ческидов В. И. Безвзрывная технология добычи полезных ископаемых: состояние и перспективы. Ч. II. Оценка эффективности применения различных способов разрушения в технологиях открытых горных работ // Физико-технические проблемы разработки полезных ископаемых. 2004. № 2. С. 66–75.

26. Клыков Ю. Г., Гуриев Т. С. Определение зависимости влияния параметров гранулометрического состава измельченного материала на энергетические параметры дезинтеграции // Горный информационно-аналитический бюллетень (научно-технический журнал). 2014. № 1. С. 34–38.

27. Матвеев И. А., Матвеев А. И., Еремеева Н. Г., Филиппов В. Е. Модель движения частиц в восходящем потоке по искривленной поверхности // Горный информационно-аналитический бюллетень (научно-технический журнал). 2014. № 10. С. 179–182.

28. Крутиков В. С., Лопатнев А. Г. Особенности гидродинамических характеристик импульсных процессов в сжимаемой среде при многократном (пульсирующем) законе ввода энергии // Письма в журнал технической физики. 1999. Т. 25. № 14. С. 34–41.

29. Хайруллин М. Р., Золотоносов Я. Д. Сопряженная задача теплообмена при течении степенной жидкости во вращающемся канале «конфузор-диффузор» овального сечения // Известия Казанского государственного архитектурно-строительного университета. 2012. № 1. С. 94–102.

30. Аникин В. С., Аникин В. В. Моделирование гидродинамических вихревых потоков с ультразвуковыми кавитационными процессами // Вестник Рязанского государственного радиотехнического университета. 2008. № 2. С. 61–66.

31. Патент № 2646270, Российская Федерация, МПК В03В 5/00. Способ инициирования кавитационно-гидродинамической микродезинтеграции минеральной составляющей гидросмеси / Н. П. Хрунина. Заявл. 12.04.2017; опубл. 02.03.2018.

32. Патент № 2327039, Российская Федерация, МПК Е21С 41/30, В03В 5/02. Способ разработки россыпей и технологический комплекс для его осуществления / В. С. Литвинцев, Н. П. Хрунина, Ю. А. Мамаев, В. С. Алексеев. Заявл. 25.12.2006; опубл. 20.06.2008.

33. Патент № 1559503, Российская Федерация, МПК В03В 5/70. Установка для обогащения песков россыпей / Ю. А. Мамаев, Н. П. Хрунина. Заявл. 10.10.1988; опубл. 10.11.1996.



## References

1. Neronskii G. I., Borodavkin S. I. Estimation method of gold contents in placers with dominant small and thin gold secretions. *Zolotodobycha: reklamno-informatsionnyi byulleten'*. 2012;1:21-24. (In Russ.).
2. Khrunina N. P., Stratechuk O. V. *New aspects of scientific and technological foundations of hydrodynamic microdesintegration in the development of high-clay gold-bearing deposits of the Far Eastern region*. Khabarovsk: Pacific National University; 2018. 155 p. (In Russ.).
3. Man'kov V. M., Serzhanin P. V. Development and testing of a method and device for effective disintegration and classification of boulder clay ores and sands. *Zolotodobycha: reklamno-informatsionnyi byulleten'*. 2019;11:18-20. (In Russ.).
4. Kislyakov V. E., Nikitin A. V. Preparation of loam sand of placer deposits to scrubbing by observation water saturation. *Gornyi zhurnal*. 2010;2:28-30. (In Russ.).
5. Elshin V. V., Melnik S. A. Current status and perspectives of development technology gold desorption from the saturated activated carbon. *Austrian Journal of Technical and Natural Sciences*. 2014;9-10:114-118. (In Russ.).
6. Rukovich A. V., Rochev V. F. Disintegration of frozen clay rocks under the influence of chemical fields and the aquatic environment. *Uspekhi sovremennogo estestvoznaniya = Advances in current natural sciences*. 2017;5:123-127. (In Russ.).
7. De Michelis I., Olivieri A., Ubaldini S., Ferella F., Beolchini F., Vegliò F. Roasting and chlorine leaching of gold-bearing refractory concentrate: experimental and process analysis. *International Journal of Mining Science and Technology*. 2013;23(5):709-715. <https://doi.org/10.1016/j.ijmst.2013.08.015>.
8. Surimbayev B., Bolotova L., Mishra B., Baikonurova A. Intensive cyanidation of gold from gravity concentrates in a drum-type apparatus. *Izvestiya Natsional'noi akademii nauk Respubliki Kazakhstan. Seriya geologii i tekhnicheskikh nauk = News of the National Academy of Sciences of the Republic of Kazakhstan. Series of Geology and Technical Sciences*. 2018;5:32-37. <https://doi.org/10.32014/2018.2518-170X.7>.
9. Krupskaya L. T., Mamaev Yu. A., Khrunina N. P., Litvintsev V. S., Ponomarchuk G. P. Ecological bases of rational land management under placer development in the Far East. Vladivostok – Khabarovsk: Dal'nauka; 1997. 76 p. (In Russ.).
10. Khrunina N. P., Mamaev Ju. A., Stratechuk O. V., Khrunin T. O. *Multilevel plant for recovery of valuable minerals*. Patent RF, no. 2187373; 2002. (In Russ.).
11. Zlatev M., Kolomietts A. Hydro-Clean: it is possible to extract more gold from refractory ores. *Globus*. 2021;1:170-179. (In Russ.).
12. Kochnev V. G., Grushinskaya O. V. *Disintegration of hard-to-wash sands with high-plastic clay*. *Zolotodobycha: reklamno-informatsionnyi byulleten'*. 2021;2:22-26. (In Russ.).
13. Chanturiya V. A., Bunin I. Zh. Unconventional high-energy methods of disintegration and opening of fine mineral complexes. *Fiziko-tekhnicheskie problemy razrabotki poleznykh iskopayemykh*. 2007;3:107-128. (In Russ.).
14. Mamaev U. A., Khrunina N. P. Determination of optimal initial operation factors sonic impact on pulp in rock pool to open the exploitation of the mineral deposit. *Gornyi informatsionno-analiticheskii byulleten' = Mining informational and analytical bulletin*. 2009;7:187-191. (In Russ.).
15. Coulter T., Subasinghe G. K. N. A mechanistic approach to modelling Knelson concentrators. *Minerals Engineering*. 2005;18(1):9-17. <https://doi.org/10.1016/j.mineng.2004.06.035>.
16. Sakuhuni G., Altun N. E., Klein B., Tong L. A novel laboratory procedure for predicting continuous centrifugal gravity concentration applications: the gravity release analysis. *International Journal of Mineral Processing*. 2016;154:66-74. <https://doi.org/10.1016/j.minpro.2016.07.004>.
17. Ghaffari A., Farzanegan A. An investigation on laboratory Knelson Concentrator separation performance: part 1: retained mass modelling. *Minerals Engineering*. 2017;112:57-67. <https://doi.org/10.1016/j.mineng.2017.07.006>.
18. Noaparast M., Laplante A. R. Free gold particles selection and breakage functions estimation. *Iranian Journal of Science and Technology. Transaction B: Engineering*. 2004;28(6):667-677.
19. Fullam M., Watson B., Laplante A., Gray S. Advances in gravity gold technology. In: Adams M. D. (ed.). *Gold ore processing: project development and operations*. Amsterdam: Elsevier; 2016. p.301–314.
20. Laplante A., Gray S. Advances in gravity gold technology. *Developments in Mineral Processing*. 2005;15:280-307. [https://doi.org/10.1016/S0167-4528\(05\)15013-3](https://doi.org/10.1016/S0167-4528(05)15013-3).
21. Koppalkar S., Bouajila A., Gagnon C., Noel G. Understanding the discrepancy between prediction and plant GRG recovery for improving the gold gravity performance. *Minerals Engineering*. 2011;24(6):559-564. <https://doi.org/10.1016/j.mineng.2010.09.007>.
22. Laplante A. R. *A standardized test to determine gravity recoverable gold*. Available from: <https://www.911metallurgist.com/blog/wp-content/uploads/2015/10/Test-Determine-How-Much-Gravity-Recoverable-Gold.pdf>. [Accessed 16<sup>th</sup> May 2021].
23. Laplante A. R., Dunne R. C. The Gravity recoverable gold test and flash flotation. In: *Proceeding 34<sup>th</sup> Annual Meeting of the Canadian Mineral Processors*. Ottawa; 2002. Available from: <http://seprosystems.com/language/wp-content/uploads/2016/09/laplante.pdf>. [Accessed 16<sup>th</sup> May 2021].
24. Urakaev F. Kh., Shumskaya L. G., Kirillova E. A., Kondrat'ev S. A. Stageswise disintegration and mechanical activation in dressing of tin-bearing waste. *Fiziko-tekhnicheskie problemy razrabotki poleznykh iskopayemykh*. 2021;3:158-167. <https://doi.org/10.15372/FTPRPI20210315>. (In Russ.).
25. Labutin V. N., Mattis A. R., Zaitsev G. D., Cheskidov V. I. Blast-free technology of mineral mining: state and prospects. Part II. Estimation of the efficiency of various failure methods in opencast mining technologies. *Fiziko-tekhnicheskie problemy razrabotki poleznykh iskopayemykh*. 2004;2:66-75. (In Russ.).



26. Klykov Yu. G., Guriev T. S. Effect of grain size composition of ground material on energy parameters of the material disintegration. *Gornyi informatsionno-analiticheskii byulleten' (nauchno-tekhnicheskii zhurnal) = Mining informational and analytical bulletin (scientific and technical journal)*. 2014;1:34-38. (In Russ.).

27. Matveev I. A., Matveev A. I., Yeremeyeva N. G., Filippov V. E. Model of particle motion in upstream along the curved surface. *Gornyi informatsionno-analiticheskii byulleten' (nauchno-tekhnicheskii zhurnal) = Mining informational and analytical bulletin (scientific and technical journal)*. 2014;10:179-182. (In Russ.).

28. Krutikov V. S., Lopatnev A. G. Features of hydrodynamic characteristics of pulse processes in a compressible medium under multiple (pulsating) law of energy input. *Pis'ma v zhurnal tekhnicheskoi fiziki*. 1999;25(14):34-41. (In Russ.).

29. Khairullin M. R., Zolotonosov Ya. D. Conjugate heat transfer problem in the flow of power-law fluid in the rotating "confuser-diffuser" channel with oval section.

*Izvestiya Kazanskogo gosudarstvennogo arkhitekturno-stroitel'nogo universiteta = News of the Kazan State University of Architecture and Engineering*. 2012;1:94-102. (In Russ.).

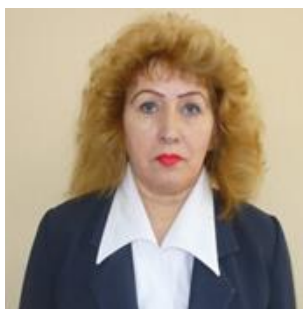
30. Anikin V. S., Anikin V. V. Modelling of hydrodynamical vortical streams with ultrasonic cavitation processes. *Vestnik Ryazanskogo gosudarstvennogo radiotekhnicheskogo universiteta = Vestnik of Ryazan State Radio Engineering University*. 2008;2:61-66. (In Russ.).

31. Khrunina N. P. Method of initiation of the cavitation-hydrodynamic microdisintegration of the mineral composition of hydrosol. Patent RF, no. 2646270; 2018. (In Russ.).

32. Litvintsev V. S., Khrunina N. P., Mamaev J. A., Alekseev V. S. Excavation method of alluvial deposits and technological complex for its fulfillment. Patent RF, no. 2327039; 2008. (In Russ.).

33. Mamaev Ju. A., Khrunina N. P. Unit for enriching placer sands. Patent RF, no. 1559503; 1996. (In Russ.).

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



##### Хрунина Наталья Петровна,

кандидат технических наук,  
ведущий научный сотрудник Лаборатории разработки россыпных месторождений,  
Институт горного дела ДВО РАН,  
г. Хабаровск, Россия,  
npetx@mail.ru,  
<https://orcid.org/0000-0001-8117-0922>.

##### Natalia P. Khrunina,

Cand. Sci. (Eng.),  
Leading Researcher of the Laboratory of Placer Deposit Development,  
Mining Institute of the Far Eastern Branch of the Russian Academy of Sciences,  
Khabarovsk, Russia,  
npetx@mail.ru,  
<https://orcid.org/0000-0001-8117-0922>.

#### Вклад автора / Contribution of the author

Автор выполнила исследовательскую работу, на основании полученных результатов провела обобщение, подготовила рукопись к печати.

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

#### Конфликт интересов / Conflict of interests

Автор заявляет об отсутствии конфликта интересов.

The author declares no conflicts of interests.

Автор прочитал и одобрил окончательный вариант рукописи.

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

#### Информация о статье / Information about the article

Статья поступила в редакцию 04.06.2021; одобрена после рецензирования 14.07.2021; принята к публикации 18.08.2021.

The article was submitted 04.06.2021; approved after reviewing 14.07.2021; accepted for publication 18.08.2021.



Научная статья

УДК 622.882

<https://doi.org/10.21285/2686-9993-2021-44-3-323-332>



## Процесс формирования осыпей на нерабочих бортах карьеров и его влияние на восстановление растительности

Константин Павлович Галайда<sup>a</sup>, Борис Леонидович Тальгамер<sup>b</sup>

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

Автор, ответственный за переписку: Галайда Константин Павлович, galanna82@yandex.ru

**Резюме.** Целью проведенных исследований являлось изучение закономерностей формирования осыпей и оценка их влияния на самозарастания нарушенных земель после отработки месторождений строительного камня. Авторами были изучены процессы природного образования осыпей, определена их слоистость и гравитационная сортировка, установлены факторы, обуславливающие процесс обрушения уступов. При помощи моделирования процесса осыпеобразования установлена зависимость дальности разлета породы от высоты уступов, углов их откоса, а также от массы отдельных кусков. Установлены углы откоса уступа с наибольшим и с наименьшим разлетом породы. Моделирование показало влияние углов откоса уступа и параметров осыпи, образовавшейся у подножия уступов, на дальность разлета обломков. Выделены три ярко выраженные стадии формирования осыпей у подножия уступов, определены углы, при которых происходит переход от одной стадии осыпеобразования к другой. Даны рекомендации по улучшению условий самозарастания и минимизации негативного фактора осыпеобразования. Для формирования слоя рыхлых отложений на горизонтальных площадках уступов предлагается использовать не привезенную техногенную смесь или потенциально плодородные грунты, а породы из осыпи, что резко сокращает затраты на рекультивацию. С целью повышения интенсивности самозарастания бортов карьеров рекомендуется увеличивать высоту уступов и ширину берм без изменения проектного угла откоса борта карьера. Для снижения негативного влияния осыпеобразования на процесс восстановления растительности на бортах у подножия уступов предлагается формировать траншею для сбора осыпающихся пород или камнезащитный вал.

**Ключевые слова:** открытые горные работы, карьеры, нарушенные земли, осыпеобразование, рекультивация, самозарастание

**Для цитирования:** Галайда К. П., Тальгамер Б. Л. Процесс формирования осыпей на нерабочих бортах карьеров и его влияние на восстановление растительности // Науки о Земле и недропользование. 2021. Т. 44. № 3. С. 323–332. <https://doi.org/10.21285/2686-9993-2021-44-3-323-332>.

Original article

## Scree formation on nonmining flank of an opencast and its impact on vegetation restoration

Konstantin P. Galaida<sup>a</sup>, Boris L. Talgamer<sup>b</sup>

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

Corresponding author: Konstantin P. Galaida, galanna82@yandex.ru

**Abstract.** The purpose of the conducted research is to study the regularities of scree formation and assess their impact on self-vegetation of disturbed lands after mining of building stone deposits. The processes of natural formation of scree have been studied, their layering and gravitational alignment have been determined, the factors causing pit bench collapse have been identified. Simulation of the scree formation process allowed to establish the dependence of rock spreading distance on bench height, bench slope angles, as well as on the weight of individual pieces. The slope bench angles with the largest and smallest rock spread distance were found. The simulation showed the influence of the slope bench angles and parameters of the scree formed at the foot of pit benches on the range of debris spread. Three distinct formation stages of scree at the foot of the benches are identified. The angles of transition from one stage of scree formation to another are determined. Recommendations are given to improve the conditions of self-vegetation and minimize the negative factor of scree formation. To form a layer of loose sediments on horizontal bench sites it is proposed to use rocks from scree, which can dramatically reduce the cost of reclamation rather than imported man-made mixture or potentially fertile soils. In order to increase self-vegetation intensity on the flanks of opencasts, it is recommended to increase the bench height and berm width without changing the design angle of the opencast flank slope. To reduce the adverse impact of scree formation on vegetation restoration on the sides at the bench foot, it is proposed to form a trench collecting falling rocks or a rock-protecting wall.

© Галайда К. П., Тальгамер Б. Л., 2021



**Keywords:** open-pit mining, open pit, disturbed lands, scree formation, reclamation, self-vegetation

**For citation:** Galaida K. P., Talgamer B. L. Scree formation on nonmining flank of an opencast and its impact on vegetation restoration. *Nauki o Zemle i nedropol'zovanie = Earth sciences and subsoil use*. 2021;44(3):323-332. (In Russ.). <https://doi.org/10.21285/2686-9993-2021-44-3-323-332>.

### Введение

Осыпи являются характерным элементом природного горного ландшафта, встречаются повсеместно и существенно влияют на растительный покров в местах их формирования. Под осыпями понимают скопления обломков, скатывающихся по склону под действием силы тяжести и отлагающихся у его подножия. Важнейшими условиями для образования осыпей являются крутой уклон земной поверхности, обилие скальных выходов коренных пород, сухой или морозный климат с интенсивным накоплением продуктов физического выветривания<sup>1–3</sup>. Осыпи очень характерны для высокогорной зоны, то есть той, где продукты выветривания не закрепляются растительностью.

Образование осыпей продолжается до тех пор, пока их уклон не станет меньше угла естественного откоса. «Живые» осыпи характерны для склонов круче 65°, относительно подвижные – для склонов с крутизной 45–65°.

Коллювий оползания имеет признаки гравитационной сортировки материала по размеру: вверху осыпи остается более мелкий, щебневый материал, а к низу, к подножию, нарастает количество и размер крупных глыб,

поскольку они обладают большей массой (и, соответственно, кинетической энергией) и в процессе движения скатываются дальше мелких кусков породы.

По крупности обломочного материала осыпи в самом общем виде подразделяются на глыбовые, щебеночные и дресвяные. Глыбовые осыпи формируются за счет разрушения массивных пород (интрузивных пород, лав, кристаллических сланцев, массивных известняков, песчаников) и приурочены преимущественно к высокогорным районам. Менее прочные, в основном осадочные породы образуют среднеобломочные (щебнистые) и мелкообломочные (дресвяные) осыпи<sup>1–3</sup>.

Множественность актов осыпания создает и некоторую слоистость во всем теле осыпи – грубую наклонную гравитационную слоистость, близкую к углам естественного откоса<sup>3</sup> [1, 2].

Данный процесс формирования подтверждается натурными наблюдениями и моделированием (рис. 1).

Несмотря на то что процесс образования осыпей встречается повсеместно и многие авторы уделяют большое внимание склоновым процессам, в том числе устойчивости бортов



**Рис. 1. Осыпь на карьере «Буровщина»**

**Fig. 1. Scree at the Burovshchyna opencast**

<sup>1</sup> Белюченко И. С. Экология Краснодарского края: учеб. пособие. Краснодар: Изд-во КубГау, 2010. 356 с.

<sup>2</sup> Ежова А. В. Литология: учебник. Томск: Изд-во ТПУ, 2009. 336 с.

<sup>3</sup> Попов Ю.В., Пустовит О.Е. Общая геология: учеб. пособие. Москва – Берлин: Директ-Медиа, 2016. 48 с.





и уступов карьеров на рабочих участках<sup>4</sup> [3, 4], противокаменпадной защите от обвально осыпных явлений [5–10], деформации откосов с учетом ухудшения геологических и горнотехнических условий разработки месторождений с качественно новыми подходами к обеспечению устойчивости бортов карьеров [11, 12], а также возможности продуктивного использования осыпавшегося материала с целью создания благоприятных условий для самозарастания [13–15], сам процесс формирования осыпей на карьерах по добыче строительного камня недостаточно изучен.

Важным фактором, влияющим на процесс самозарастания берм уступов в карьерах, является осыпаящаяся длительное время с вышележащих горизонтов порода. Осыпи повреждают пионерную растительность, появившуюся на бермах, и, разрастаясь, препятствуют самовосстановлению растительного покрова.

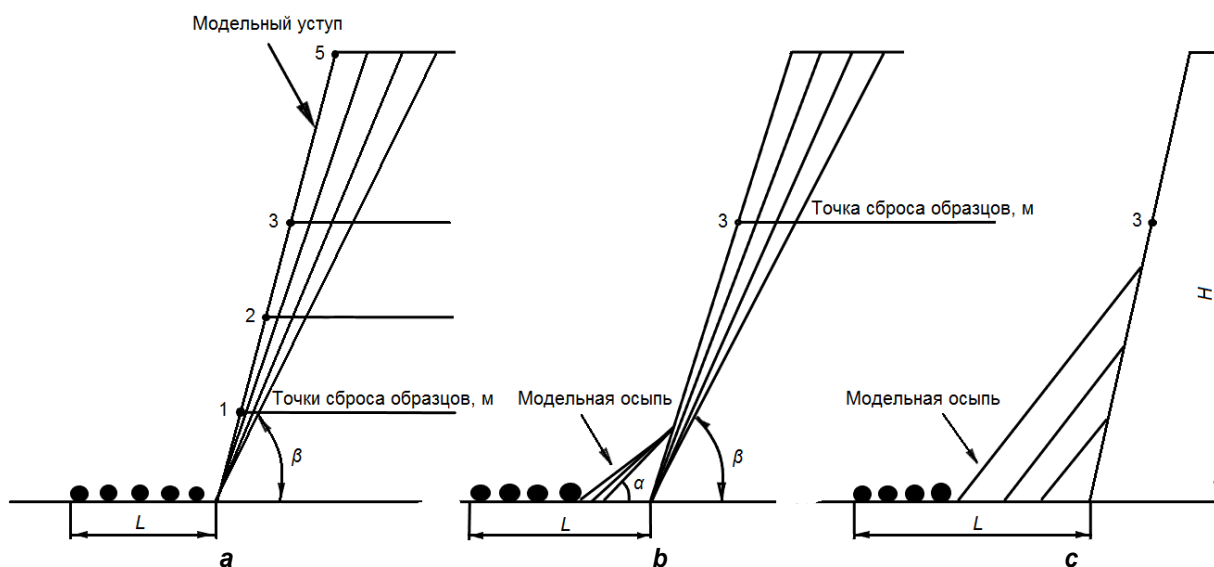
### Материалы и методы исследований

С целью исследования процесса формирования осыпей на бермах карьеров и поиска путей уменьшения его негативного влияния на самозарастание берм было проведено физическое моделирование этого процесса.

Для моделирования процесса осыпеобразования использовали материал, привезенный с карьеров, в виде камней средней фракции, из которых было отобрано 30 образцов размером 5–10 см и массой от 0,2 до 2,9 кг. Модельный уступ был собран из досок 40×150 мм длиной 6 м в форме желоба шириной 300 мм с высотой стенок 150 мм. Образцы сбрасывались по желобу на бетонное основание, близкое по своим характеристикам к скальному. В процессе исследования изменялись высота (от 1 до 5 м), а также углы наклона откосов уступов (рис. 2). Поверхность осыпи моделировали с помощью многослойной фанеры, изменяя ее положение относительно поверхности бермы и измеряя углы. В зависимости от указанных выше параметров устанавливалась дальность разлета кусков породы относительно подножия уступа и принималось средневзвешенное значение.

### Результаты исследований и их обсуждение

Всего было проведено более 3120 замеров со сбросом с разной высоты около 2,5 т камней при использовании различных модельных параметров уступов. Результаты исследований приведены на рис. 3.



**Рис. 2. Исследуемые параметры процесса осыпеобразования в зависимости:**

*a – от угла откоса уступа; b – от углов откоса уступа и осыпи; c – от высоты осыпи*

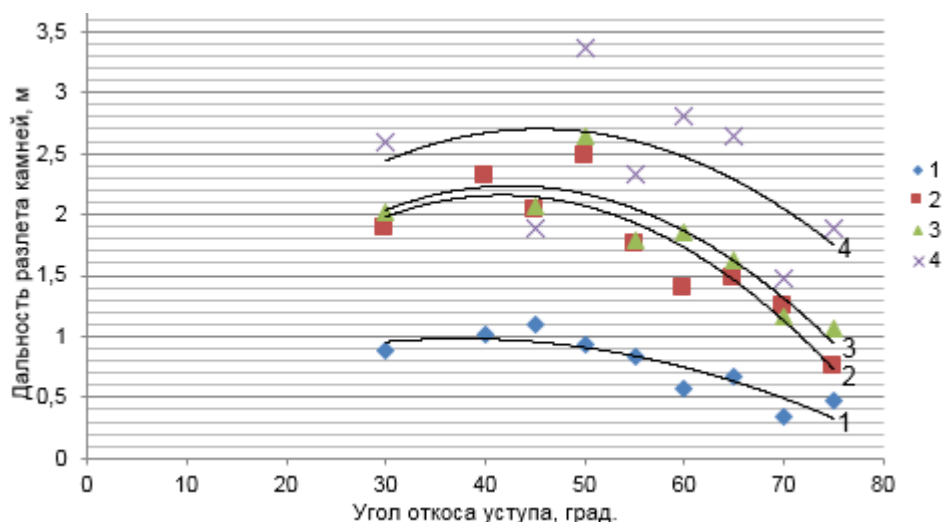
*L – дальность разлета камней, м; H – высота уступа, м; α – угол откоса осыпи, град.; β – угол откоса уступа, град.*

**Fig. 2. Studied parameters of scree formation depending on:**

*a – bench slope angle; b – bench and scree slope angles; c – scree height;*

*L – rock spread distance, m; H – bench height, m; α – scree slope angle, degree; β – bench slope angle, degree*

<sup>4</sup> Ананьев В. П., Потапов А. Д. Инженерная геология: учебник для вузов. М.: Высшая школа, 2005. 575 с.

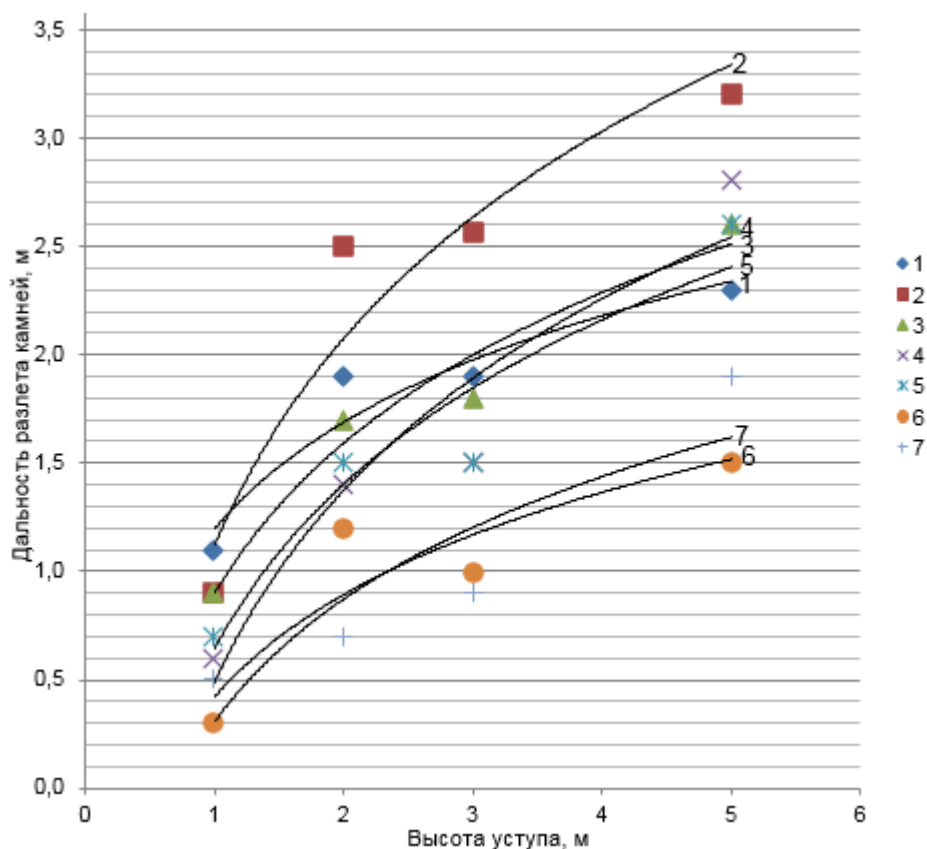


**Рис. 3. Зависимость дальности разлета камней от угла откоса уступа при различной высоте уступа:**  
1 – 1 м; 2 – 2 м; 3 – 3 м; 4 – 5 м

**Fig. 3. Dependence of rock spread distance on bench slope angle at different bench height:**  
1 – 1 m; 2 – 2 m; 3 – 3 m; 4 – 5 m

Зависимость дальности разлета камней от угла откоса уступа показывает, что по мере уменьшения углов откоса уступа с 70–75° дальность разлета камней постепенно увеличивается, достигая максимальных значений

при углах 40–50°, а в дальнейшем несколько уменьшается. С увеличением высоты уступа разлет камней увеличивается независимо от углов откоса. Однако больший разлет отмечается при углах, близких к 50° (рис. 4) [16].



**Рис. 4. Зависимость дальности разлета камней от высоты уступа при различных углах откоса уступа:**  
1 – 45°; 2 – 50°; 3 – 55°; 4 – 60°; 5 – 65°; 6 – 70°; 7 – 75°

**Fig. 4. Dependence of rock spread distance on bench height at different angles of bench slope:**  
1 – 45°; 2 – 50°; 3 – 55°; 4 – 60°; 5 – 65°; 6 – 70°; 7 – 75°



Из результатов исследования можно сделать вывод о том, что при устойчивых породах, позволяющих формировать более крутые уступы, разлет обломков, падающих с вышележащих горизонтов, будет заметно меньше, а площадь, подвергающаяся негативному воздействию обломков, будет минимальной.

В работах [17, 18] приведены зависимости коэффициента трения от размера камней и установлено, что чем меньше размер куса породы, тем выше коэффициент трения. Для уточнения этой зависимости было отобрано шесть модельных образцов (три образца массой 0,4–0,5 кг и три – массой 1–1,3 кг), которые сбрасывались с модельного уступа высотой 2 м с повторением не менее 60 раз. При этом определялась средняя дальность разлета. В результате было выявлено, что с увеличением массы камней незначительно увеличивается и их разлет по берме (рис. 5).

В работе [17] рассмотрено влияние сложного рельефа поверхности уступа на дальность отскока кусков породы. Для определения влияния на разлет камней сформировавшейся у подножия уступа осыпи при моделировании использовали многослойную фанеру, выполняющую роль поверхности осыпи с разными углами откоса. Результаты исследова-

ний, представленные на рис. 6, показали, что с появлением осыпавшейся породы у подножия уступа разлет падающих обломков с вышележащих горизонтов существенно увеличивается. Это, в свою очередь, будет негативно влиять на растительность.

Нарастание осыпей у подножия уступа происходит по-разному на всех этапах формирования. На первоначальном этапе осыпь активно растет в длину до угла 20–25°, далее она растет преимущественно вверх до угла 35–40°, затем осыпь растет примерно одинаково и в длину, и в высоту (рис. 7). Зная этот факт, можно по текущему состоянию установить, в какой стадии формирования находится осыпь, что косвенно может указывать на срок состояния горной выработки (в том случае, если на формирование осыпей не влияют горные работы и дополнительно не ведется засыпка берм).

Знания о процессе формирования осыпи дают возможность определять, как будет развиваться растительность на самих осыпях и на бермах. Если осыпь находится на начальном этапе формирования и активно растет в длину, то растительность, появившаяся у подножия осыпи, будет подвергаться негативному влиянию осыпавшейся породы и засыпаться обломками. Если осыпь находится

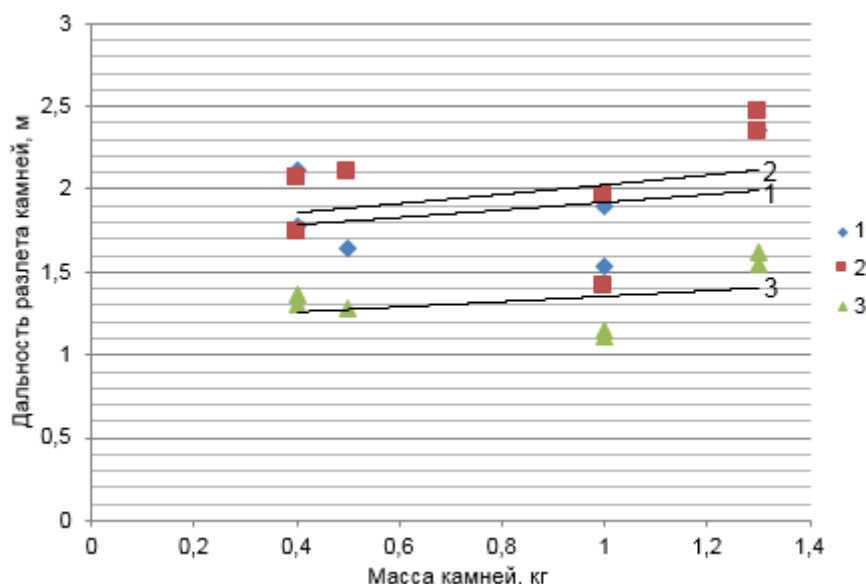


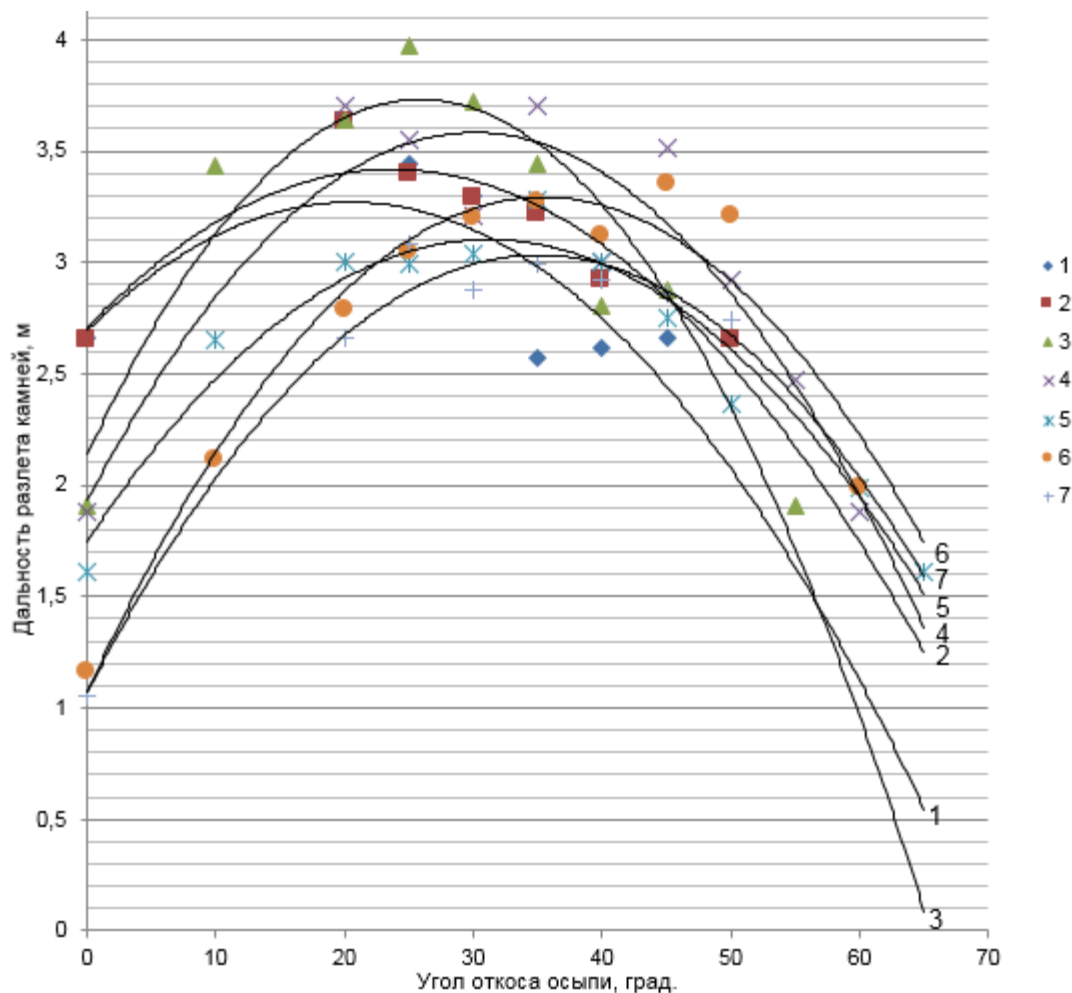
Рис. 5. Зависимость дальности разлета камней от их массы при различных углах откоса уступа (высота уступа – 2 м):  
1 – 30°; 2 – 50°; 3 – 60°

Fig. 5. Dependence of rock spread distance on their weight at different angles of bench slope (bench height is 2 m):  
1 – 30°; 2 – 50°; 3 – 60°



в средней фазе формирования, то растительность у подножия осыпи может успеть окрепнуть до третьего этапа формирования, что в дальнейшем благоприятно скажется на процессе самозарастания. Обломочный мате-

риал, осыпавшийся с вышележащих горизонтов, не будет иметь большой потенциальной энергии и будет задерживаться уже сформировавшейся растительностью.

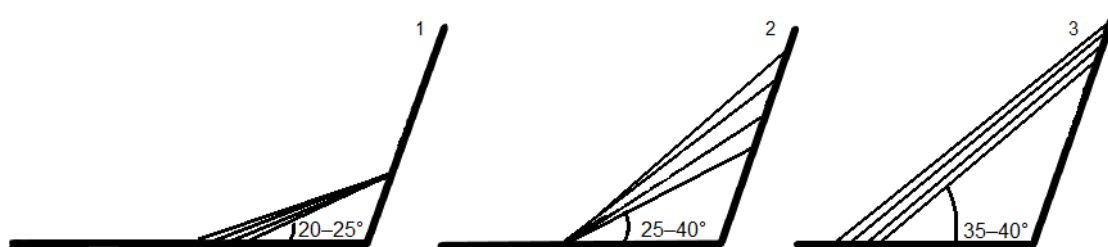


**Рис. 6. Зависимость дальности разлета камней по берме от угла откоса осыпи при различных углах откоса уступа (высота уступа – 3 м):**

1 – 45°; 2 – 50°; 3 – 55°; 4 – 60°; 5 – 65°; 6 – 70°; 7 – 75°

**Fig. 6. Dependence of rock spread distance along berm on scree slope angle at different bench slope angles (bench height is 3 m):**

1 – 45°; 2 – 50°; 3 – 55°; 4 – 60°; 5 – 65°; 6 – 70°; 7 – 75°



**Рис. 7. Процесс формирования осыпи:**

1 этап – осыпь формируется преимущественно в длину; 2 этап – осыпь формируется в основном в высоту;  
3 этап – осыпь формируется равномерно в длину и высоту

**Fig. 7. Scree formation:**

stage 1 – scree is formed mainly in length; stage 2 – scree is formed mainly in height;  
stage 3 – scree is formed equally in length and in height



Для оценки влияния высоты осыпи на разлет камней было проведено моделирование процесса с использованием щитов фанеры разного размера (см. рис. 2, с), что позволило при равном угле и одной высоте уступа создавать разную высоту осыпи. Установлено, что при небольшой высоте осыпи разлет камней увеличивается, а с нарастанием ее высоты разлет заметно уменьшается. Это связано с тем, что при небольшой высоте осыпи падающие камни от нее отскакивают в сторону от подножия уступа, а с увеличением высоты осыпи камни по ней сползают и скатываются (рис. 8).

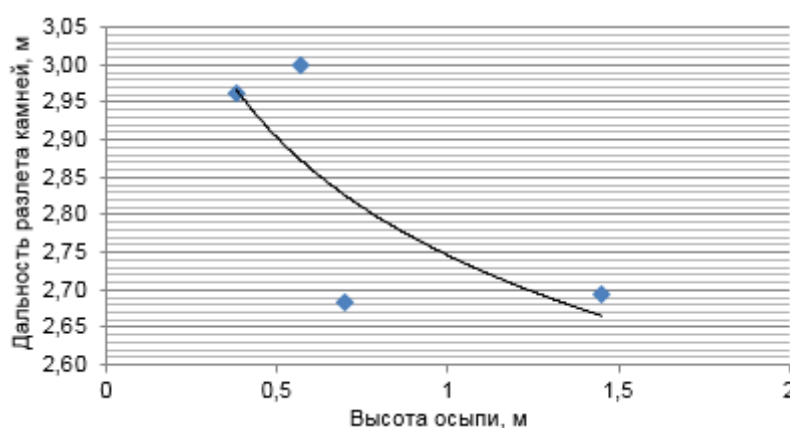
Процесс осыпеобразования на карьерах по добыче строительного камня идет неизменно, и осыпи на бермах карьеров находятся в движении и со временем меняют свой профиль. Было установлено, что процесс формирования имеет три ярко выраженные стадии. Первая стадия характеризуется ростом осыпи в длину до угла  $\alpha = 2-25^\circ$ , далее осыпеобразование переходит во вторую стадию, на которой осыпь растет уже вверх до угла  $\alpha = 25-40^\circ$ , после чего процесс переходит в третью стадию, когда осыпь растет равномерно и в длину, и в высоту. С появлением осыпи дальность разлета камней увеличивается, и при углах откоса уступа  $\beta = 55-65^\circ$  и угле осыпи  $\alpha = 25^\circ$  величина разлета  $L$  имеет максимальное значение. С ростом высоты осыпи разлет камней существенно снижается.

Таким образом, результаты исследований показали целесообразность создания у подножия уступа траншеи глубиной 0,5–0,8 м или предохранительного вала высотой 1–2 м, которые позволят удерживать осыпающуюся породу, имеющую максимальный разлет на начальной стадии формирования осыпи, и тем самым уменьшить повреждение формирующейся растительности. Далее по мере засыпания траншеи уже появившаяся растительность на бермах успеет заметно окрепнуть и будет противостоять расширению осыпи. Комплекс мероприятий по созданию траншеи или вала следует производить сразу после завершения добычных работ.

Породы на карьерах по добыче строительного камня достаточно устойчивые и позволяют формировать угол погашенного уступа<sup>5</sup> до  $60-70^\circ$ , целесообразно принимать высоту уступов 25–30 м с оставлением предохранительных берм шириной 10–12 м.

Для создания благоприятных условий самозарастания нерабочих бортов следует на бермах уступов оставлять слой рыхлых отложений мощностью около 0,4–0,5 м [19, 20].

Ввиду небольшой ценности добываемого на карьерах строительного материала целесообразно оставлять разрыхленные породы на бермах без зачистки скального основания. Этот материал со временем будет насыщаться мелкими фракциями и органикой, что



**Рис. 8. Зависимость дальности разлета камней от высоты осыпи при угле осыпи  $40^\circ$  и высоте уступа 3 м (угол откоса уступа –  $65^\circ$ )**

**Fig. 8. Dependence of rock spread distance on scree height at the scree angle of  $40^\circ$  and the bench height of 3 m (bench slope angle is  $65^\circ$ )**

<sup>5</sup> Инструкция по наблюдениям за деформациями бортов, откосов уступов и отвалов на карьерах и разработке мероприятий по обеспечению их устойчивости. Утв. Госгортехнадзором СССР 21.07.1970.





станет способствовать закреплению растительности [21, 22]. Если проектом рекультивации предусмотрено нанесение на бермы плодородного слоя или потенциально плодородных пород, то их следует наносить за траншеей или ограждающим валом, для того чтобы обрушающаяся порода их не засыпала.

### Заключение

В заключение вышеизложенного можно сделать следующие выводы:

1. Параметры осыпей, образующихся у подножия уступов, в первую очередь зависят от их высоты, углов откосов и состава пород. Установлено, что процесс формирования осыпей имеет три ярко выраженные стадии. На первой стадии осыпь растет в длину до угла  $\alpha = 20\text{--}25^\circ$ , после чего осыпеобразование

переходит во вторую стадию, на которой осыпь растет уже вверх до угла  $\alpha = 25\text{--}40^\circ$ , а затем в третью стадию, когда осыпь растет равномерно и в длину, и в высоту. С появлением осыпи дальность разлета камней увеличивается и при углах откоса уступа  $\beta = 55\text{--}65^\circ$  и угле осыпи  $\alpha = 25^\circ$  достигает максимальных значений.

2. Для ускорения процесса самозарастания берм на нерабочих бортах карьера рекомендуется создавать на них слой рыхлых отложений мощностью 0,4–0,5 м, а для предотвращения повреждения древесной поросли у подножия уступов – формировать траншею для сбора осыпающихся пород или делать камнезащитный вал из рыхлых отложений с целью уменьшения дальности разлета кусков породы.

### Список источников

1. Зеньков И. В., Нефедов Б. Н., Барадулин И. М., Юронен Ю. П., Вокин В. Н., Кирюшина Е. В. Технологии рекультивации и обустройство нарушенных земель в Западной и Восточной Сибири: монография. Красноярск: Изд-во СФУ, 2015. 308 с.
2. Тальгамер Б. Л., Галайда К. П. Исследование условий самозарастания нарушенных земель при добыче строительного камня // Геология, поиски и разведка полезных ископаемых и методы геологических исследований: материалы Междунар. науч.-техн. конф. «Геонауки-2020». Т. 20. Иркутск: Изд-во ИРНТУ, 2020. С. 172–179.
3. Dorthi K., Chandar K. R. Slope stability monitoring in opencast coal mine based on wireless data acquisition system-a case study // International Journal of Engineering & Technology. 2018. Vol. 7. Iss. 2.21. P. 24–28. <https://doi.org/10.14419/ijet.v7i2.21.11829>.
4. Лазаревич К. С. Склоновые процессы // География. 2001. № 26.
5. Баринов А. Ю. Обоснование выбора конструкции противокаменной завесы для защиты от обвально-осыпных явлений в карьерах // Горный журнал. 2021. № 1. С. 119–121. <https://doi.org/10.17580/gzh.2021.01.21>.
6. Мелихов М. В., Решетняк С. П. Обоснование проектов по инженерной защите техногенных откосов от оползневых и скально-обвальных явлений при строительстве дорог различного назначения // Мир дорог. 2016. № 90. С. 48–53.
7. Решетняк С. П., Аврамова Н. С., Мелихов М. В. Проектирование карьерных дорог и их защиты // Мир дорог. 2017. № 100. С. 66–69.
8. Мелихов М. В., Чащинов Г. В. Применение технологии скейлинг для защиты карьерного автотранспорта от камнепадов // Труды Ферсмановской научной сессии Геологического института Кольского научного центра Российской академии наук. 2017. № 14. С. 311–314.
9. Мелихов М. В., Мелихов Д. В. Опыт защиты людей при проведении инженерных изысканий на карьерных уступах // Проблемы недропользования. 2017. № 1. С. 175–181. <https://doi.org/10.18454/2313-1586.2017.01.175>.
10. Мелихов М. В. Концепция возведения временных противокаменных сооружений на карьерах // Проблемы недропользования. 2018. № 2. С. 130–138. <https://doi.org/10.25635/2313-1586.2018.02.130>.
11. Kumar V., Parkash V. A model study of slope stability in mines situated in south India // Advances in Applied Science Research. 2015. Vol. 6. Iss. 8. P. 82–90.
12. Шубин Г. В., Заровняев Б. Н., Акишев А. Н., Лукин Э. Р. Защита транспортных берм от камнепада с уступов бортов глубоких карьеров // Известия Тульского государственного университета. Науки о Земле. 2019. № 2. С. 243–252.
13. Галайда К. П., Тальгамер Б. Л. Анализ состояния нарушенных земель на карьерах по добыче камня // Безопасность-2014: сборник науч. Тр. XIX Всерос. студ. науч.-практ. конф. с междунар. уч. Иркутск: Изд-во ИРНТУ, 2014. С. 106–108.
14. Зеньков И. В., Барадулин И. М. Результаты исследования условий появления и формирования растительного покрова в отработанных щебеночных карьерах // Уголь. 2017. № 12. С. 69–71. <https://doi.org/10.18796/0041-5790-2017-12-69-71>.
15. Козыбаева Ф. Е., Котухов Ю. А., Бейсеева Г. Б., Ажикина Н. Ж., Сатеков Е. Я., Саркулова Ж. Естественное восстановление растительного покрова, его видовой состав в условиях самозарастания и рекультивации промышленных отвалов рудного месторождения Тишинка ВКО // Почвоведение и агрохимия. 2018. № 4. С. 53–69.
16. Каюмова А. Н. Прогноз последствий камнепада в карьерах // Горный информационно-аналитический бюллетень. 2004. № 9. С. 257–261.



17. Несмашний Є. О., Ткаченко Г. І., Герасимова К. В. Розроблення фізико-математичної моделі скочування бутів гірської породи з породних відкосів // Гірничий вісник. 2020. Вип. 107. С. 101–106. <https://doi.org/10.31721/2306-5435-2020-1-107-101-106>.

18. Барон Л. И. Характеристики трения горных пород. М.: Наука, 1967. 208 с.

19. Галайда К. П., Тальгамер Б. Л. Антропогенная нагрузка карьеров по добыче строительного камня на окружающую среду Южного Прибайкалья // Сучасні проблеми екології: тези XVII Всеукраїнської наукової on-line конференції здобувачів вищої освіти і молодих учених з міжнародною участю. Житомир: Житомирська

політехніка, 2021. С. 147–148.

20. Галайда К. П., Тальгамер Б. Л. Исследование влияния климата на процесс самозарастания карьеров по добыче известняка // XXI век. Техносферная безопасность. 2021. Т. 6. № 2. С. 211–220. <https://doi.org/10.21285/2500-1582-2021-2-211-220>.

21. Галайда К. П., Тальгамер Б. Л. Оценка эффективности самовосстановления нарушенных земель при добыче строительного камня // Проблемы освоения минеральной базы Восточной Сибири: сб. науч. тр. Вып. 14. Иркутск: Изд-во ИРГТУ, 2014. С. 30–36.

22. Павлов В. Н. Растительный покров Западного Тянь-Шаня. М.: Изд-во МГУ, 1980. 246 с.

## References

1. Zen'kov I. V., Nefedov B. N., Baradulin I. M., Yuronen Yu. P., Vokin V. N., Kiryushina E. V. *Reclamation technologies and development of disturbed lands in Western and Eastern Siberia*. Krasnoyarsk: Siberian Federal University; 2015. 308 p. (In Russ.).

2. Talgamer B. L., Galaida K. P. Investigation of self-organized vegetation conditions of disturbed areas at building stone extraction. In: *Geologiya, poiski i razvedka poleznykh iskopaemykh i metody geologicheskikh issledovaniy: materialy Mezhdunarodnoi nauchno-tehnicheskoi konferentsii "Geonauki-2020" = Geology, prospecting and exploration of minerals and methods of geological research: materials of the International scientific and technical conference Geosciences-2020*. Vol. 20. Irkutsk: Irkutsk National Research Technical University; 2020. p.172–179. (In Russ.).

3. Dorthi K., Chandar K. R. Slope stability monitoring in opencast coal mine based on wireless data acquisition system-a case study. *International Journal of Engineering & Technology*. 2018;7(2.21):24-28. <https://doi.org/10.14419/ijet.v7i2.21.11829>.

4. Lazarevich K. S. Slope processes. *Geografiya*. 2001;26. (In Russ.).

5. Barinov A. Yu. Justification of rockfall-and-rockslide protection screen design for open pit mines. *Gornyi zhurnal*. 2021;1:119-121. (In Russ.). <https://doi.org/10.17580/gzh.2021.01.21>.

6. Melikhov M. V., Reshetnyak S. P. Rationale for projects on rockfall-and-rockslide engineering protection of technological slopes under construction of various-purpose roads. *Mir dorog*. 2016;90:48-53. (In Russ.).

7. Reshetnyak S. P., Avraamova N. S., Melikhov M. V. Design of quarry roads and their protection. *Mir dorog*. 2017;100:66-69. (In Russ.).

8. Melikhov M. V., Chashchinov G. V. Application of scaling technology for the protection of quarry vehicles from rockfalls. *Trudy Fersmanovskoi nauchnoi sessii Geologicheskogo instituta Kol'skogo nauchnogo tsentra Rossiiskoi akademii nauk*. 2017;14:311-314. (In Russ.).

9. Melikhov M. V., Melikhov D. V. Experience of people protection carrying out engineering survey on pit benches. *Problemy nedropol'zovaniya*. 2017;1:175-181. (In Russ.). <https://doi.org/10.18454/2313-1586.2017.01.175>.

10. Melikhov M. V. Conception of construction of temporary anti-rockfall facilities on the open pits. *Problemy*

*nedropol'zovaniya*. 2018;2:130-138. (In Russ.). <https://doi.org/10.25635/2313-1586.2018.02.130>.

11. Kumar V., Parkash V. A model study of slope stability in mines situated in south India. *Advances in Applied Science Research*. 2015;6(8):82-90.

12. Shubin G. V., Zarovnyaev B. N., Akishev A. N., Lukin E. R. Protection of the transport berms from rockfall from the slopes of the sides of deep open pits. *Izvestiya Tul'skogo gosudarstvennogo universiteta. Nauki o Zemle = News of the Tula state university. Natural sciences*. 2019;2:243-252. (In Russ.).

13. Galaida K. P., Talgamer B. L. Analysis of disturbed land condition in open pits for stone mining. In: *Bezopasnost'-2014: sbornik nauchnykh trudov XIX Vserossiiskoi studencheskoi nauchno-prakticheskoi konferentsii s mezhdunarodnym uchastiem = Safety-2014: collected scientific works of the 19th All-Russian student scientific and practical conference with international participation*. Irkutsk: Irkutsk National Research Technical University; 2014. p.106–108. (In Russ.).

14. Zenkov I. V., Baradulin I. M. Study results of vegetation emergence and formation in depleted crushed stone quarries. *Ugol' = Russian Coal Journal*. 2017;12:69-71. <https://doi.org/10.18796/0041-5790-2017-12-69-71>. (In Russ.).

15. Kozybaeva F. E., Kotuhov Yu. A., Beiseeva G. B., Azhikina N. Zh., Satekov E. Ya., Sarkulova J. Natural regeneration of plant cover, their species composition in the conditions of self-overgrowing and recultivation of industrial dumps of ore deposit of Tishinka eastern Kazakhstan region. *Pochvovedenie i agrokhimiya = Soil Science and Agrochemistry*. 2018;4:53-69. (In Russ.).

16. Kayumova A. N. Forecast of rockfall consequences in open pit mines. *Gornyi informatsionno-analiticheskiy byulleten' = Mining informational and analytical bulletin*. 2004;9:257-261. (In Russ.).

17. Nesmashnii E. O., Tkachenko G. I., Gerasimova K. V. Development of a physical and mathematical model for rock rubble rolling from rock slopes. *Gornyi vestnik = Mining Journal*. 2020;107:101-106. (In Ukrainian). <https://doi.org/10.31721/2306-5435-2020-1-107-101-106>.

18. Baron L. I. *Characteristics of rock friction*. Moscow: Nauka; 1967. 208 p. (In Russ.).

19. Galaida K. P., Talgamer B. L. Anthropogenic load of open pits for construction stone mining on the environment of the Southern Baikal region. In: *Sovremennye*



*problemy ekologii: tezisy XVII Vseukrainskoi nauchnoi on-line konferentsii soiskatelei vysshego obrazovaniya i molodykh uchenykh s mezhdunarodnym uchastiem = Modern environmental problems: abstracts of the 17<sup>th</sup> All-Ukrainian scientific on-line conference of applicants for higher education and young scientists with international participation.* Zhitomir: Zhitomirskaya politehnika; 2021. p.147–148. (In Russ.).

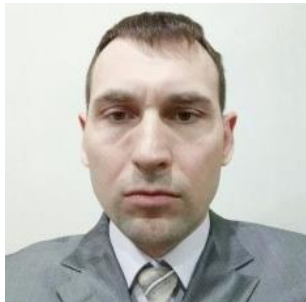
20. Galaida K. P., Talgamer B. L. A study of the impact of climate on the self-growth of limestone quarries. *XXI vek. Tekhnosferная bezopasnost' = XXI century. Techno-*

*sphere Safety.* 2021;6(2):211-220. (In Russ.). <https://doi.org/10.21285/2500-1582-2021-2-211-220>.

21. Galaida K. P., Talgamer B. L. Evaluation of disturbed land self-restoration effectiveness under building stone mining. In: *Problemy osvoeniya mineral'noi bazy Vostochnoi Sibiri = Problems of development of the mineral base of Eastern Siberia.* Iss. 14. Irkutsk: Irkutsk State Technical University; 2014. p.30–36. (In Russ.).

22. Pavlov V. N. *Vegetation cover of the Western Tien Shan.* Moscow: Lomonosov Moscow State University; 1980. 246 p. (In Russ.).

### Информация об авторах / Information about the authors



**Галайда Константин Павлович,**

аспирант,  
Институт недропользования,  
Иркутский национальный исследовательский технический университет,  
г. Иркутск, Россия,  
[galanna82@yandex.ru](mailto:galanna82@yandex.ru),  
<https://orcid.org/0000-0001-6637-0053>.

**Konstantin P. Galaida,**

Postgraduate Student,  
Institute of Subsoil Use,  
Irkutsk National Research Technical University,  
Irkutsk, Russia,  
[galanna82@yandex.ru](mailto:galanna82@yandex.ru),  
<https://orcid.org/0000-0001-6637-0053>.



**Тальгамер Борис Леонидович,**

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

**Boris L. Talgamer,**

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

### Вклад авторов / Contribution of the authors

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

### Конфликт интересов / Conflict of interests

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

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

### Информация о статье / Information about the article

Статья поступила в редакцию 02.04.2021; одобрена после рецензирования 15.07.2021; принята к публикации 20.08.2021.

The article was submitted 02.04.2021; approved after reviewing 15.07.2021; accepted for publication 20.08.2021.



Научная статья

УДК 622.243.23

<https://doi.org/10.21285/2686-9993-2021-44-3-333-343>



## Устройство для бурения плавлением с одновременным или последующим расширением скважин во льду

Данил Васильевич Сербин<sup>a</sup>, Андрей Николаевич Дмитриев<sup>b</sup>,  
Николай Иванович Васильев<sup>c</sup>

<sup>a-c</sup>Санкт-Петербургский горный университет, г. Санкт-Петербург, Россия

Автор, ответственный за переписку: Сербин Данил Васильевич, [serbin\\_dv@pers.spmi.ru](mailto:serbin_dv@pers.spmi.ru)

**Резюме.** Авторами рассматривается новая технология вскрытия подледниковых водоемов, обеспечивающая экологическую чистоту проведения геолого-разведочных работ, в основу которой заложены результаты первых вскрытий подледникового озера Восток в Антарктиде (февраль 2012 года и январь 2015 года). Первоочередной целью дальнейших исследований подледникового озера Восток является взятие чистых проб озерной воды и донных отложений, для этого необходимо прямое проникновение в озеро. Существует ряд условий, без соблюдения которых невозможно дальнейшее проведение исследований озера с использованием скважины чистого доступа на буровом комплексе «Восток». В статье обобщены главные результаты, в том числе технологические и технические решения, которые защищены патентом Российской Федерации. Подробно рассмотрено новое устройство для бурения плавлением с одновременным расширением ледовой скважины. Данное устройство объединяет два технологических процесса: бурение – за счет контактного плавления, а также увеличение диаметра скважины – за счет создания вихревого потока постоянно подогреваемого теплоносителя в призабойной зоне. Тепловой способ разрушения льда обеспечивает экологическую чистоту процесса вскрытия подледниковых водоемов и является приоритетным методом, выгодно отличающимся от существующих. Устройство получило название «тепловой буровой снаряд-расширитель». Во время сезонных работ 64-й Российской Антарктической экспедиции были проведены стендовые испытания такого устройства ТБСР 132/400, результаты которых подтвердили, что оно способно обеспечить бурение диаметром 132 мм с одновременным расширением до 400 мм.

**Ключевые слова:** Антарктида, подледниковое озеро Восток, термобуровой снаряд на грузонесущем кабеле, бурение плавлением, бурение льда

**Для цитирования:** Сербин Д. В., Дмитриев А. Н., Васильев Н. И. Устройство для бурения плавлением с одновременным или последующим расширением скважин во льду // Науки о Земле и недропользование. 2021. Т. 44. № 3. С. 333–343. <https://doi.org/10.21285/2686-9993-2021-44-3-333-343>.

Original article

## Device for fusion drilling with simultaneous or follow-up reaming of wells in ice

Danil V. Serbin<sup>a</sup>, Andrey N. Dmitriev<sup>b</sup>, Nikolay I. Vasiliev<sup>c</sup>

<sup>a-c</sup>Saint-Petersburg Mining University, Saint-Petersburg, Russia

Corresponding author: Danil V. Serbin, [serbin\\_dv@pers.spmi.ru](mailto:serbin_dv@pers.spmi.ru)

**Abstract.** The paper deals with a new opening technology for subglacial reservoirs, which ensures environmentally friendly geological exploration. The technology is based on the results of the first openings of the subglacial Lake Vostok in Antarctica (February 2012 and January 2015). The primary goal of further studies of the subglacial Lake Vostok is to take clean samples of lake water and bottom sediments, which requires direct penetration into the lake. There is a number of conditions to be met in order to conduct further studies of the lake using a clean access well at the Vostok drilling complex. The article summarizes the main results including technological and engineering solutions protected by the patent of the Russian Federation. A detailed consideration is given to a new device for fusion drilling with simultaneous reaming of an ice hole. This device combines two technological processes: drilling due to contact melting, and an increase in the diameter of the well due to the creation of a vortex flow of a continuously heated coolant in the bottomhole zone. The thermal method of ice breaking ensures the ecological cleanliness when opening subglacial reservoirs and is a priority method that favorably differs from the existing ones. The device was named a “thermal drill reamer” (TDR). During the seasonal work of the 64<sup>th</sup> Russian Antarctic Expedition bench tests of the TDR 132/400 were carried out, the results of which confirmed that the device is capable to ensure 132 mm drilling with simultaneous reaming up to 400 mm.

© Сербин Д. В., Дмитриев А. Н., Васильев Н. И., 2021



**Keywords:** Antarctica, subglacial Lake Vostok, thermal drill on a load-bearing cable, fusion drilling, ice drilling

**For citation:** Serbin D. V., Dmitriev A. N., Vasiliev N. I. Device for fusion drilling with simultaneous or follow-up reaming of wells in ice. *Nauki o Zemle i nedropol'zovanie = Earth sciences and subsoil use*. 2021;44(3):333-343. (In Russ.). <https://doi.org/10.21285/2686-9993-2021-44-3-333-343>.

## Введение

Антарктида – загадочная и малодоступная, под ее льдами – более 400 подледниковых озер [1, 2], которые длительное время находятся в изоляции от окружающей среды и определяются как скопление воды во впадине коренного ложа под ледниками [3, 4]. Такие озера содержат в своих осадках информацию об истории формирования ледников, климатических изменениях и наличии древних форм жизни. Основными направлениями исследований подледниковых водоемов являются изучение биоразнообразия флоры и фауны подобных природных объектов; исследование законов эволюции живых организмов [2, 5], которые на протяжении нескольких миллионов лет не имели контакта с атмосферой; исследование земной коры под ледяным щитом Антарктиды с целью познания ее состава и структуры до начала процесса оледенения южного полярного региона (30–40 млн лет назад); отработка технологий и инженерных решений в земных условиях для их последующего применения в космических исследованиях по поиску живых организмов на других объектах Солнечной системы [3]. Изучение подледниковых водоемов находится в начальной стадии: еще не исследованы вопросы о существовании и разнообразии жизни, а также вопросы, связанные с газовым, изотопным и гидрологическим режимом озер [6]. Найти ответы на большинство поставленных вопросов возможно только при прямом исследовании водоемов, а конкретно – в отобранных пробах озерной воды и донных отложений. Все эти исследования ученым только предстоит провести, и они должны быть выполнены с учетом ряда особых рекомендаций и условий, разработанных международными и национальными организациями, по уровням экологической безопасности проводимых научно-исследовательских работ. В частности, проникновения в подледниковые водоемы должны исключать биологическое, химическое и тепловое загрязнения, а также дестабилизацию газовых гидратов [6, 7].

В настоящее время выделяется три проекта исследования подледниковых водоемов Антарктиды: российский проект проникновения и отбора проб воды и донных отложений озера Восток, проект Великобритании по исследованию озера Элсуорт (*англ.*: Ellsworth) и американский проект по проникновению и отбору проб под ледниковым потоком Вильянс (*англ.*: Whillans Ice Stream) в Западной Антарктиде [6].

Так как для Антарктиды характерны особо осложненные условия, наибольшее распространение получили механический и тепловой способы бурения скважин во льду с применением буровых снарядов на грузонесущем кабеле или с использованием гибкой трубы с наконечником для бурения горячей водой. К сожалению, в настоящее время ни одна разработанная технология бурения скважин сквозь ледниковый массив с последующим вскрытием подледниковых водоемов, обеспечивающая вход в подледниковое пространство, не отвечает требованиям экологической безопасности. Общим риском для всех трех проектов следует считать возможное биологическое загрязнение исследуемых объектов, в то время как остальные риски зависят от используемой технологии проникновения в подледниковую среду и особенностей изучаемых водоемов [8–11]. Так, для проектов с применением технологии бурения горячей водой очевидным является тепловое загрязнение, а также в связи с небольшим периодом времени для технологических операций появляется риск потери бурового и научно-исследовательского оборудования из-за возможного примораживания к стенкам скважины или сужения ствола. Для проектов бурения сквозь ледовый массив колонковыми буровыми снарядами на грузонесущем кабеле, предусматривающих применение низкотемпературной заливочной жидкости, возможным загрязнением является проникновение этой жидкости в подледниковое пространство водоема.

Из всех известных подледниковых озер наибольший интерес для исследования вызы-





вает реликтовое озеро Восток, которое является самым глубоким и самым крупным из подледниковых озер на Земле<sup>1</sup>, [2, 13]. Бурение глубокой скважины 5Г на станции «Восток» было начато в 1990 году. В конжеляционном льде на интервале 3620–3666 м выявлено бимодальное распределение кристаллов с разной кристаллографической ориентировкой. Данный характер ориентировки кристаллов не свойственен для озерного льда, что свидетельствует о протекании в озере Восток таких процессов замерзания, которые ранее не наблюдались [14, 15].

В феврале 2012 года российскими учеными было проведено первое вскрытие озера Восток, затем в январе 2015 года осуществлено повторное вскрытие [16–18]. Скважина 5Г заполнена низкотемпературной жидкостью (смесь авиационного топлива ТС-1 и фреона F-141b) в объеме 60 м<sup>3</sup>. Используемая заливочная жидкость обладает рядом недостатков: имеет высокую проникающую способность (особенно в пористой фирновой зоне и трещиноватых льдах), а также не соответствует современным экологическим требованиям. Как показали результаты работ по вскрытию подледникового озера Восток, при дифференциальном давлении -0,2 МПа вода поднимается в скважину на 30 м в кольцевом зазоре между поверхностью снаряда и стенками скважины и обгоняет его, поднимаясь выше него примерно на 15 м. В процессе подъема воды в кольцевом зазоре происходит активное перемешивание воды с заливочной жидкостью, что приводит к образованию эмульсии. Такая технология вскрытия не соответствует требованиям научного мира по проведению данных геолого-разведочных работ, скважина 5Г, заполненная смесью керосина и фреона, после 30 лет бурения имеет высокий уровень загрязнения, а ее использование для проникновения в озеро Восток недопустимо [19, 20].

Таким образом, дальнейшее исследование озера непозволительно без выполнения ключевых условий: экологической безопасности работ; устойчивости стенок нижней части скважины, заполненной озерной водой; надеж-

ности и безотказности работы всех механизмов и систем устройства доставки научно-исследовательской аппаратуры [21–23].

### Материалы и методы исследования

Наиболее целесообразным и эффективным для изучения подледникового озера Восток является бурение новой глубокой скважины чистого доступа на станции «Восток», где в настоящее время ведутся исследования, направленные на отработку технологии вскрытия и поддержания в рабочем состоянии нижнего участка скважины на время изучения подледникового озера, что не только позволит получить абсолютно уникальную информацию по различным научным дисциплинам, но и в немалой степени укрепит престиж России в антарктических исследованиях.

*Технология вскрытия подледникового озера Восток.* Учеными Санкт-Петербургского горного университета разработана новая технология подготовки скважины, залитой экологически безопасной низкотемпературной жидкостью (полидиметилсилоксановой жидкостью), с последующим вскрытием озера Восток. Разработанная технология предусматривает расширение нижнего участка скважины, что создаст условия для контролируемого подъема озерной воды на высоту до 10 м и позволит существенно снизить колебания уровня воды в скважине при проведении спуско-подъемных операций, а также исключит загрязнение озера при проведении работ и примерзание к стенкам скважины доставочного снаряда с модулем, оснащенным научно-исследовательской аппаратурой, предупредит образование эмульсии во время подъема снаряда.

Технология подготовки скважины с последующим вскрытием подледникового озера Восток включает четыре этапа:

- бурение скважины колонковым электро-механическим снарядом (КЭМС-132) с остановкой на расстоянии 1 м от поверхности озера;

- расширение скважины на 9-метровом участке призабойной зоны механическим рас-

<sup>1</sup> Антарктика. Геоморфологический атлас. СПб.: Карта, 2011. 256 с.



ширителем с периодическим извлечением продуктов бурения (ледовый шлам) на поверхность;

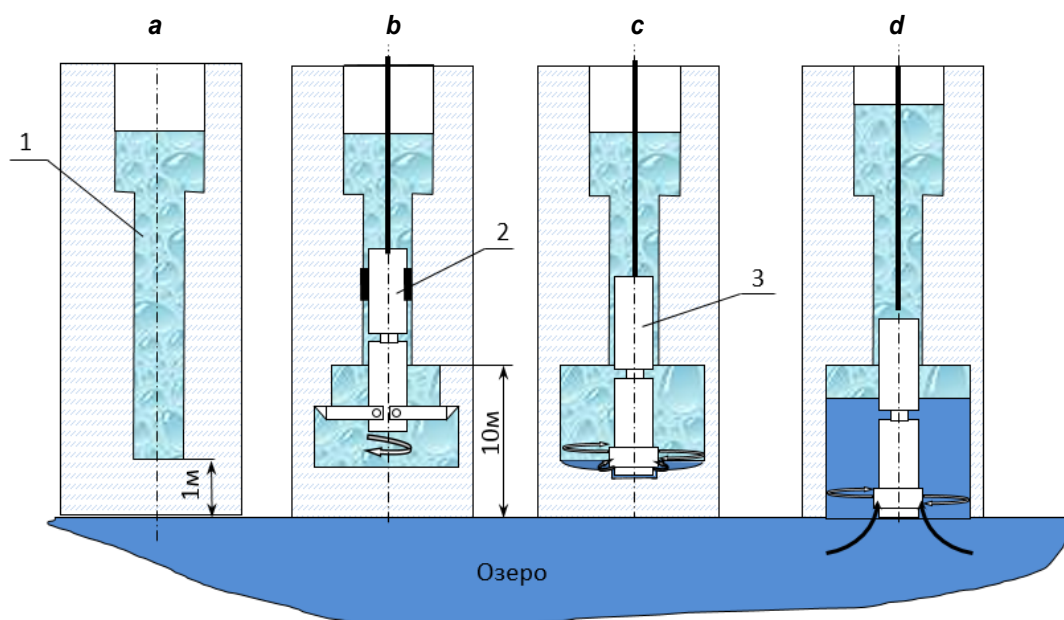
– бурение плавлением последнего метра с одновременным расширением тепловым снарядом без извлечения продуктов бурения (таяя вода) на поверхность;

– вскрытие подледникового озера, калибровка нижнего метрового участка скважины и подогрев озерной воды в скважине (рис. 1).

После вскрытия подледникового озера специальным акустическим научно-исследовательским оборудованием проводится оценка состояния расширенного участка скважины. При удовлетворительном состоянии участка доступа в озеро выполняются намеченные исследования.

Разработанная технология экологически безопасного вскрытия подледникового озера Восток включает увеличение диаметра нижнего участка скважины до 400 мм на высоту до 10 м. Расширение ствола скважины до расчетного диаметра осуществляется с применением механического и теплового расширителей. На втором этапе технологии подготовки скважины на глубине от 10 до 1 м от границы

«лед – озеро» используется механический расширитель, для которого необходимо бурение пилот-скважины стандартным колонковым электромеханическим снарядом (первый этап). Тепловой снаряд (расширитель) используется на третьем этапе бурения последнего метра между скважиной и озером с одновременным расширением скважины за счет создания вихревого потока циркуляционной жидкости (талой воды) с постоянным ее подогревом. Патентный поиск существующих технических средств, предназначенных для увеличения диаметра скважины механическим или тепловым способом, показал, что ни одно из известных устройств не подходит для осуществления разработанной технологии подготовки скважины. В связи с этим возникла необходимость разработки теплового снаряда для бурения плавлением с одновременным расширением скважины во льду. Такой механический расширитель был спроектирован и изготовлен сотрудниками Санкт-Петербургского горного университета и успешно испытан в скважных условиях во время сезона 63-й Российской Антарктической экспедиции.



**Рис. 1. Схема вскрытия подледникового озера Восток:**

*a – финальная стадия бурения скважины; б – образование расширенного участка скважины;  
с – этап расширения термобуровым снарядом; d – момент вскрытия озера  
1 – заливочная жидкость; 2 механический расширитель; 3 – тепловой буровой снаряд*

**Fig. 1. An opening scheme of the subglacial Lake Vostok:**

*a – final stage of well drilling; b – formation of the reamed section of the well;  
c – stage of reaming with a thermal drill; d – moment of lake opening  
1 – drilling fluid; 2 – mechanical reamer; 3 – thermal drill*



Технические средства для вскрытия подледникового озера должны отличаться высокой надежностью и безотказностью всех механизмов, что достигается за счет использования существующих, а также вновь спроектированных, тщательно проверенных и испытанных узлов бурового снаряда.

Тепловой буровой снаряд должен отвечать следующим техническим требованиям:

- простота и надежность конструкции;
- легкость монтажа и демонтажа снаряда;
- диаметр в транспортном положении – до 132 мм;
- возможность расширения диаметра скважины до 400 мм;
- постоянство диаметра расширенного участка скважины по всей длине;
- скорость бурения плавлением соответствует интенсивности расширения скважины;
- рабочий интервал глубин – до 4000 м;
- потребляемая мощность электроэнергии – до 10 кВт;
- количество токоведущих жил – 6 шт.;
- возможность оперативного контроля и управления параметрами бурения.

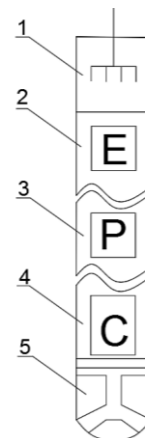
Обзор серийно выпускаемых буровых снарядов и расширителей, проведенный с учетом специфики технологии ведения буровых работ и используемого оборудования, показал, что ни один из них не может быть применен при подготовке скважины для проникновения в подледниковое озеро, так как все они не отвечают техническим требованиям.

По результатам обзора поставлена задача: создать скважинный тепловой буровой снаряд-расширитель новой конструкции, взяв за основу уже разработанные и испытанные буровые снаряды на грузонесущем кабеле, которые по своим характеристикам наиболее близки к предъявляемым техническим требованиям.

*Конструкция термобурового снаряда для бурения плавлением с одновременным или последующим расширением ледовой скважины.* Тепловой снаряд предназначен для бурения плавлением скважин во льду сплошным забоем с одновременным или последовательным их расширением. За конструктивные основы взяты созданные и успешно зарекомендовавшие себя буровые тепловые снаряды

ТЭЛГА-14М, ТБЗС, ТБЖС, СГПУ [3]. Основным отличием теплового снаряда для бурения плавлением с одновременным или последующим расширением скважин от существующих снарядов является использование рабочего органа с выполненным в нем коллектором и гидравлическими каналами, который позволяет объединить технологические процессы бурения и расширения скважины, а также отдельные системы электрического нагрева циркуляционного отсека и рабочего органа.

Тепловой снаряд для бурения плавлением сплошным забоем с одновременным или последующим расширением скважин состоит из пяти отсеков: кабельного замка 1, электрического отсека 2, насосного отсека 3, циркуляционного отсека 4 и рабочего органа 5 (рис. 2).



**Рис. 2. Принципиальная схема термобурового снаряда**

(рисунок выполнен без соблюдения масштаба)

**Fig. 2. Schematic diagram of a thermal drill**  
(the figure is made not to the scale)

Для крепления такого снаряда к грузонесущему кабелю используется стандартный кабельный замок, входящий в используемые буровые снаряды. В электрическом отсеке выполняется соединение токоведущих жил грузонесущего кабеля с энергопотребителями снаряда. Также в нем закреплен датчик осевой нагрузки на забой и электронный блок для оперативного управления снарядом.

Процесс бурения льда осуществляется контактным плавлением (кондуктивным теплообменом) сплошным забоем за счет передачи тепловой энергии от нагревателя ледовому массиву, а процесс расширения – за счет



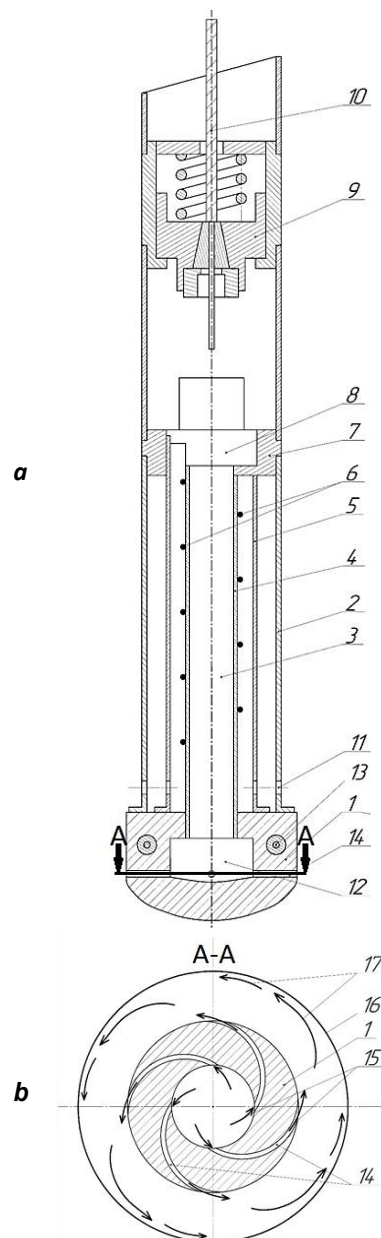
создания вихревого потока горячей жидкости в призабойной зоне, при этом разрушение льда осуществляется за счет гидродинамического воздействия на стенки скважины и конвективного теплообмена при принудительной циркуляции жидкости.

Термобуровой снаряд для бурения плавлением сплошным забоем с одновременным или последующим расширением ледовых скважин [24] включает кабельный замок 9 для крепления его на грузонесущем кабеле 10, цилиндрический корпус 2, в нижней части которого выполнены заборные горизонтальные окна 11. В корпусе 2 размещен насосный отсек 7 с установленным в нем насосом 8. Нижняя часть насосного отсека 7 соединена с центральной двойной трубой 3, состоящей из наружной водоподъемной трубы 5 и внутренней водонагнетательной трубы 4, на внешней стороне которой закреплен нагревательный элемент 6, представляющий собой нагревательный кабель КНМС НХ (рис. 3).

Формирующий забой рабочий орган 1 болтовыми соединениями жестко крепится к корпусу 2. Рабочий орган 1 выполнен в форме цилиндра с закругленными нижними краями и сплошной торцевой поверхностью. Внутри рабочего органа 1 выполнен коллектор 12. В нижней части рабочего органа 1 из коллектора 12 выполнены дугообразные каналы 14, выходящие на поверхность рабочего органа 1, расположенные диаметрально противоположно относительно друг друга. Внутри рабочего органа 1 жестко закреплен кольцевой нагревательный элемент 13 [25].

Дугообразные каналы 14 малого диаметра (4–5 мм) выполнены таким образом (см. рис. 3), что подвод нагретого теплоносителя 15 к стенкам скважины 16 осуществляется тангенциально. Наличие коллектора 12 и выполненные в нем дугообразные каналы 14 способствуют созданию регулируемого вихревого потока 17 и равномерной подаче нагретого теплоносителя 15 к стенкам скважины 16, что обеспечивает постоянство диаметра по всем радиальным направлениям [25].

**Принцип работы термобурового снаряда для бурения плавлением с одновременным или последующим расширением ледовой скважины.** Работа термобурового снаряда



**Рис. 3. Схема термобурового снаряда для бурения плавлением с одновременным или последующим расширением скважин:**

*a* – общий вид устройства;

*b* – рабочий орган, вид сверху

**Fig. 3. Diagram of a thermal drill for fusion drilling with simultaneous or subsequent well reaming:**

*a* – general view of the device;

*b* – working body, top view

осуществляется следующим образом. После постановки теплового снаряда на забой подается напряжение на кольцевой нагревательный элемент 13 рабочего органа 1 при выключенном насосе 8, при этом происходит контактное плавление льда. Когда талая вода в процессе углубки снаряда перекроет заборные окна 11 над верхним торцом рабочего органа



1, включаются насос 8 и нагревательный элемент 6 центральной двойной трубы 3. Вода поднимается по водоподъемной трубе 5, при этом нагревается за счет отдачи тепловой энергии нагревательным элементом 6 и попадает в насос 8, после чего подается насосом 8 в водонагнетательную трубу 4, из которой попадает в коллектор 12, забирая часть тепловой энергии от рабочего органа 1, а затем выходит в затрубное пространство через дугообразные каналы 14. Подогретая вода, выходя из каналов 14, оплавляя стенки скважины 16, при этом тепловая энергия затрачивается на прогрев льда до температуры фазового перехода и его плавление. После чего вода попадает в снаряд через заборные окна 11 и цикл повторяется. Таким образом осуществляется призабойная циркуляция теплоносителя 15, при этом происходит его постоянный нагрев.

Ориентация именно дугообразных каналов 14 обеспечивает закручивание потока теплоносителя 15 вокруг оси скважины по типу «сегнерова кольца», что приводит к равномерному воздействию и распространению гидродинамических и тепловых потоков в призабойной зоне.

При выключенном насосе 8 устройством можно производить только бурение плавлением скважины без ее расширения, в этом случае скорость проходки достигает максимальных значений, так как затраты тепловой энергии направлены на процесс бурения. При стационарном размещении теплового снаряда на заданной глубине можно производить образование локальной полости (каверны) минимальной по высоте и максимальной по простираанию.

### **Результаты исследования и их обсуждение**

Интенсивность расширения скважины во время бурения зависит от температуры ледника, мощности нагревательных элементов и производительности насоса. При известных значениях названных параметров объем расплавленного льда за единицу времени определяется по разности температур выходящего и входящего теплоносителя. Температура выходящего потока не меняется во

времени, а температура входящего теплоносителя зависит от диаметра расширения и определяется аналитически. Производительность насоса влияет на время плавления, форму и объем участка расширения, поскольку от интенсивности циркуляции теплоносителя в снаряде зависит его температура. Поэтому во внимание принимается не температура входящего потока, а разность температур.

На данную конструкцию теплового бурового снаряда получен патент на изобретение RU № 2700143 С1.

При проведении сезонных буровых работ 64-й Российской Антарктической экспедиции была собрана и испытана модель теплового снаряда для бурения плавлением с одновременным или последующим расширением скважин. Первые экспериментальные исследования показали, что разработанная конструкция теплового бурового снаряда отвечает заявленным техническим требованиям и он способен осуществлять процесс бурения с одновременным расширением скважины во льду. Также испытания выявили и недостатки собранной модели: потери тепла в рабочем органе и циркуляционном отсеке; низкое давление насоса; неравномерность нагрева поверхности рабочего органа. В связи с этим сотрудниками Санкт-Петербургского горного университета доработана модель данного бурового снаряда, а в будущих сезонных работах Российской Антарктической экспедиции будут проведены его стендовые и скважинные испытания.

### **Заключение**

Разработанный тепловой снаряд для бурения плавлением с одновременным или последующим расширением ледовых скважин соответствует всем требованиям технического задания, так как обеспечивает экологическую безопасность при выполнении вышеуказанных геолого-разведочных работ.

Основными достоинствами данного устройства являются способность одновременно со стабильной проходкой скважины производить расширение ее сечения, вести образование локальных полостей, а также то, что оно надежно в работе, имеет низкое





энергопотребление и простую конструкцию. При его использовании достигается снижение энергоемкости процесса бурения с одновременным расширением за счет более равномерного распределения гидравлических и тепловых потоков по площади как забоя, так и стенок скважины, а также за счет принудительной призабойной циркуляции теплоносителя.

Создание вихревого потока теплоносителя позволяет образовывать стенки скважины постоянного диаметра на всем участке бурения при постоянной скорости бурения. Эти преимущества повышают общую технологическую культуру данного процесса и позволяют обеспечить реализацию проведения необходимых геолого-разведочных работ.

#### Список источников

1. Wright A., Siegert M. J. The identification and physiological setting of Antarctic subglacial lakes: an update based on recent geophysical data, in Antarctic Subglacial Aquatic Environments // Proceedings of the Chapman Conference on the Exploration and Study of Antarctic Subglacial Aquatic Environments. Washington: AGU, 2011. P. 9–26.
2. Siegert M. J., Ross N., Le Brocq A. M. Recent advances in understanding Antarctic subglacial lakes and hydrology // Philosophical Transactions of the Royal Society. A: Mathematical, Physical and Engineering Sciences. 2016. Vol. 374. Iss. 2059. <https://doi.org/10.1098/rsta.2014.0306>.
3. Васильев Н. И., Большунов А. В., Дмитриев А. Н., Подоляк А. В., Сербин Д. В. Спускоподъемное устройство с полиспастной системой для исследования подледникового озера «Восток» // Международный научно-исследовательский журнал. 2016. № 9. Ч. 2. С. 137–140. <https://doi.org/10.18454/IRJ.2016.51.062>.
4. McKay R. M., Barrett P. J., Levy R. S., Naish T. R., Golledge N. R., Pyne A. Antarctic Cenozoic climate history from sedimentary records: ANDRILL and beyond // Philosophical Transactions of the Royal Society. A: Mathematical, Physical and Engineering Sciences. 2016. Vol. 374. Iss. 2059. <https://doi.org/10.1098/rsta.2014.0301>.
5. Bulat S. A., Alekhina I. A., Lipenkov V. Y., Lukin V. V., Marie D., Petit J. R. Cell concentrations of microorganisms in glacial and lake ice of the Vostok ice core, East Antarctica // Microbiology. 2009. Vol. 78. Iss. 6. P. 808–810. <https://doi.org/10.1134/S0026261709060216>.
6. Алехина И. А., Васильев Н. И., Липенков В. Я. Проблемы защиты окружающей среды и экологического мониторинга в проектах изучения подледниковых озер Антарктиды // Лед и снег. 2012. Т. 52. № 4. С. 104–114. <https://doi.org/10.15356/2076-6734-2012-4-104-114>.
7. Онишин В. П. Комплекс технических средств для изыскательских работ на шельфе арктических морей // Записки Горного института. 2012. Т. 197. С. 46–49.
8. Fricker H. A., Powell R., Priscu J., Tulaczyk S., Anandakrishnan S., Christner B., et al. Siple Coast subglacial aquatic environments: the Whillans Ice Stream Subglacial Access Research Drilling (WISSARD) project // Proceedings of the Chapman Conference on the Exploration and Study of Antarctic Subglacial Aquatic Environments. Washington: AGU, 2011. P. 199–220.
9. Christner B. C., Royston-Bishop G., Foreman C. M., Arnold B. R., Tranter M., Welch K. A., et al. Limnological conditions in Subglacial Lake Vostok, Antarctica // Limnology and Oceanography. 2006. Vol. 51. Iss. 6. P. 2485–2501. <https://doi.org/10.4319/lo.2006.51.6.2485>.
10. Methodology for clean access to the subglacial environment associated with the Whillans Ice Stream // ATCM IP 72. 34 Antarctic Treaty Consultative Meeting. Buenos Aires, 2011.
11. Priscu J. C., Powell R. D., Tulaczyk S. Probing subglacial environments under the Whillans Ice Stream // Eos (Transactions, American Geophysical Union). 2010. Vol. 91. Iss. 29. P. 253–254. <https://doi.org/10.1029/2010EO290002>.
12. Масолов В. Н., Попов С. В., Лукин В. В., Попков А. М. Рельеф дна и водное тело подледникового озера Восток, Восточная Антарктида // Доклады Академии наук. 2010. Т. 433. № 5. С. 693–698.
13. Васильев Н. И., Дмитриев А. Н., Блинов П. А. Бурение глубокой скважины на российской антарктической станции «Восток» // Вестник Отделения наук о Земле Российской академии наук. 2012. Т. 4. NZ2001. <https://doi.org/10.2205/2012NZ000111>.
14. Полякова Е. В. Статистическая обработка результатов микроструктурного анализа ледяных кернов из глубоких скважин на станции «Восток» (Центральная Антарктида) // Записки Горного института. 2007. Т. 173. С. 17–19.
15. Полякова Е. В. Структурные особенности льда озера Восток (Центральная Антарктида) // Записки Горного института. 2009. Т. 182. С. 45–47.
16. Lukin V. V., Vasiliev N. I. Technological aspects of the final phase of drilling borehole 5G and unsealing Vostok Subglacial Lake, East Antarctica // Annals of Glaciology. 2014. Vol. 55. Iss. 65. P. 83–89. <https://doi.org/10.3189/2014AoG65A002>.
17. Литвиненко В. С. Уникальные техника и технологии бурения скважин во льдах Антарктиды // Записки Горного института. 2014. Т. 210. С. 5–10.
18. Литвиненко В. С., Васильев Н. И. Разработка породоразрушающего инструмента для бурения скважин во льду // Записки Горного института. 2012. Т. 197. С. 15–20.
19. Липенков В. Я., Лукин В. В., Булат С. А., Васильев Н. И., Екайкин А. А., Лейченков Г. Л. [и др.]. Итоги исследования подледникового озера Восток в период МПГ // Вклад России в Международный полярный год 2007/08: полярная криосфера и воды суши / ред. В. М. Котляков. М. – СПб.: Паулсен, 2011. С. 17–45.
20. Clow G. D., Koci B. R. A fast mechanical access drill for polar glaciology, paleoclimatology, geology, tectonics and biology // Memoirs of National Institute of Polar



Research. 2002. Vol. 56. P. 5–37.

21. Kennicutt M. C., Siegert M. J. Subglacial aquatic environments: a focus of 21<sup>st</sup> century Antarctic science // Antarctic subglacial aquatic environments / eds. M. Siegert, C. Kennicutt, B. Bindschadler. Washington: AGU, 2011. P. 1–8.

22. Большунов А. В., Васильев Н. И., Дмитриев А. Н., Подоляк А. В., Сербин Д. В., Туркеев А. В. Особенности технологии экологически безопасного вскрытия озера Восток в Антарктиде и технические средства для ее реализации // Бурение в осложненных условиях: материалы Междунар. науч.-практ. конф. СПб.: ЛЕМА, 2016. С. 13–14.

23. Барков Н. И. Первая скважина на станции Восток // Лед и снег. 2012. № 4. С. 9–11.

24. Пат. № 2700143 С1, Российская Федерация, МПК Е21В7/15. Тепловой снаряд для бурения плавлением / Н. И. Васильев, Д. В. Сербин, А. Н. Дмитриев, А. В. Большунов. Заявл. 15.04.2019; опубл. 12.09.2019. Бюл. № 26.

25. Сербин Д. В., Васильев Н. И., Дмитриев А. Н., Большунов А. В. Тепловой снаряд для бурения плавлением с одновременным расширением ледовых скважин // Новые идеи в науках о Земле: материалы XIV Междунар. науч.-практ. конф. М.: Изд-во МГРИ, 2019. С. 297–300.

## References

1. Wright A., Siegert M. J. The identification and physiological setting of Antarctic subglacial lakes: an update based on recent geophysical data, in Antarctic Subglacial Aquatic Environments. *Proceedings of the Chapman Conference on the Exploration and Study of Antarctic Subglacial Aquatic Environments*. Washington: AGU; 2011. p.9–26.

2. Siegert M. J., Ross N., Le Brocq A. M. Recent advances in understanding Antarctic subglacial lakes and hydrology. *Philosophical Transactions of the Royal Society. A: Mathematical, Physical and Engineering Sciences*. 2016;374(2059). <https://doi.org/10.1098/rsta.2014.0306>.

3. Vasilev N. I., Bolshunov A. V., Dmitriev A. N., Podoliak A. V., Serbin D. V. Pulling-and-running gear with reeving system for investigations of subglacial lake Vostok. *Mezhdunarodnyi nauchno-issledovatel'skii zhurnal = International Research Journal*. 2016;9(2):137–140. (In Russ.). <https://doi.org/10.18454/IRJ.2016.51.062>.

4. McKay R. M., Barrett P. J., Levy R. S., Naish T. R., Golledge N. R., Pyne A. Antarctic Cenozoic climate history from sedimentary records: ANDRILL and beyond. *Philosophical Transactions of the Royal Society. A: Mathematical, Physical and Engineering Sciences*. 2016;374(2059). <https://doi.org/10.1098/rsta.2014.0301>.

5. Bulat S. A., Alekhina I. A., Lipenkov V. Y., Lukin V. V., Marie D., Petit J. R. Cell concentrations of microorganisms in glacial and lake ice of the Vostok ice core, East Antarctica. *Microbiology*. 2009;78(6):808–810. <https://doi.org/10.1134/S0026261709060216>.

6. Alekhina I. A., Vasiliev N. I., Lipenkov V. Y. Environment protection and environment monitoring issues in the projects of subglacial lakes studies in Antarctica. *Led i sneg = Ice and Snow*. 2012;52(4):104–114. (In Russ.). <https://doi.org/10.15356/2076-6734-2012-4-104-114>.

7. Onishchik V. P. Technical equipments for realization investigation works on shelf of arctic seas. *Zapiski Gornogo instituta = Journal of Mining Institute*. 2012;197:46–49. (In Russ.).

8. Fricker H. A., Powell R., Priscu J., Tulaczyk S., Anandakrishnan S., Christner B., et al. Siple Coast subglacial aquatic environments: the Whillans Ice Stream Subglacial Access Research Drilling (WISSARD) project. *Proceedings of the Chapman Conference on the Exploration and Study of Antarctic Subglacial Aquatic Environments*.

Washington: AGU; 2011. p.199–220.

9. Christner B. C., Royston-Bishop G., Foreman C. M., Arnold B. R., Tranter M., Welch K. A., et al. Limnological conditions in Subglacial Lake Vostok, Antarctica. *Limnology and Oceanography*. 2006;51(6):2485–2501. <https://doi.org/10.4319/lo.2006.51.6.2485>.

10. Methodology for clean access to the subglacial environment associated with the Whillans Ice Stream. *ATCM IP 72. 34 Antarctic Treaty Consultative Meeting*. Buenos Aires; 2011.

11. Priscu J. C., Powell R. D., Tulaczyk S. Probing subglacial environments under the Whillans Ice Stream. *Eos (Transactions, American Geophysical Union)*. 2010;91(29):253–254. <https://doi.org/10.1029/2010EO290002>.

12. Masolov V. N., Popov S. V., Lukin V. V., Popkov A. M. Bottom relief and water body of the subglacial Lake Vostok, East Antarctica. *Doklady Akademii nauk*. 2010;433(5):693–698. (In Russ.).

13. Vasiliev N. I., Dmitriev A. N., Blinov P. A. Drilling of a deep bore-hole at Vostok station (East Antarctica). *Vestnik Otdeleniya nauk o Zemle Rossiiskoi akademii nauk*. 2012;4:NZ2001. (In Russ.). <https://doi.org/10.2205/2012NZ000111>.

14. Polyakova E. V. Statistical processing of the results of microstructural analysis of ice cores from deep wells at Vostok station (Central Antarctica). *Zapiski Gornogo instituta = Journal of Mining Institute*. 2007;173:17–19. (In Russ.).

15. Polyakova E. V. Structural features of the Lake Vostok ice (Central Antarctica). *Zapiski Gornogo instituta = Journal of Mining Institute*. 2009;182:45–47. (In Russ.).

16. Lukin V. V., Vasiliev N. I. Technological aspects of the final phase of drilling borehole 5G and unsealing Vostok Subglacial Lake, East Antarctica. *Annals of Glaciology*. 2014;55(65):83–89. <https://doi.org/10.3189/2014AoG65A002>.

17. Litvinenko V. S. Unique engineering and technology for drilling boreholes in Antarctic ice. *Zapiski Gornogo instituta = Journal of Mining Institute*. 2014;210:5–10. (In Russ.).

18. Litvinenko V. S., Vasil'ev N. I. Rock-destroying tool development for ice well drilling. *Zapiski Gornogo instituta = Journal of Mining Institute*. 2012;197:15–20. (In Russ.).

19. Lipenkov V. Ya., Lukin V. V., Bulat S. A., Vasil'ev



N. I., Ekaikin A. A., Leichenkov G. L., et al. The results of studying the subglacial Lake Vostok during the international polar year. In: Kotlyakov V. M. (ed.). *Vklad Rossii v Mezhdunarodnyi polyarnyi god 2007/08: polyarnaya kriosfera i vody sushy = Contribution of Russia to the International polar year 2007/08: polar cryosphere and land waters*. Moscow – Saint Petersburg: Paulsen; 2011. p.17–45. (In Russ.).

20. Clow G. D., Koci B. R. A fast mechanical access drill for polar glaciology, paleoclimatology, geology, tectonics and biology. *Memoirs of National Institute of Polar Research*. 2002;56:5–37.

21. Kennicutt M. C., Siegert M. J. Subglacial aquatic environments: a focus of 21<sup>st</sup> century Antarctic science. In: Siegert M., Kennicutt C., Bindshadler B. (eds.). *Antarctic subglacial aquatic environments*. Washington: AGU; 2011. p.1–8.

22. Bol'shunov A. V., Vasil'ev N. I., Dmitriev A. N., Podolyak A. V., Serbin D. V., Turkeev A. V. Technological features of environmentally safe opening of the Vostok

Lake in Antarctica and technical equipment for its implementation. In: *Burenie v oslozhnennykh usloviyakh: materialy Mezhdunarodnoi nauchno-prakticheskoi konferentsii = Drilling in Complicated Conditions: materials of the International scientific and practical conference*. Saint Petersburg: LEMA; 2016. p.13–14. (In Russ.).

23. Barkov N. I. First bore-hole at Vostok station. *Led i sneg = Ice and Snow*. 2012;4:9–11.

24. Vasilev N. I., Serbin D. V., Dmitriev A. N., Bol'shunov A. V. *Thermal shell for melting drilling*. Patent RF, no. 2700143 C1; 2019. (In Russ.).

25. Serbin D. V., Vasil'ev N. I., Dmitriev A. N., Bol'shunov A. V. Thermal drill for fusion drilling with simultaneous expansion of ice wells. *Novye idei v naukakh o Zemle: materialy XIV Mezhdunarodnoi nauchno-prakticheskoi konferentsii = New Ideas in the Earth Sciences: materials of the 14<sup>th</sup> International scientific and practical conference*. Moscow: Sergo Ordzhonikidze Russian State University for Geological Prospecting; 2019. p.297–300. (In Russ.).

### Информация об авторах / Information about the authors



**Сербин Данил Васильевич**,  
ведущий инженер НЦ «Арктика»,  
Санкт-Петербургский горный университет,  
г. Санкт-Петербург, Россия,  
serbin\_dv@pers.spmi.ru,  
<https://orcid.org/0000-0002-9855-7178>.  
**Danil V. Serbin**,  
Leading Engineer of the Scientific Center Arctic,  
Saint-Petersburg Mining University,  
Saint-Petersburg, Russia,  
serbin\_dv@pers.spmi.ru,  
<https://orcid.org/0000-0002-9855-7178>.



**Дмитриев Андрей Николаевич**,  
кандидат технических наук,  
доцент кафедры бурения скважин,  
Санкт-Петербургский горный университет,  
г. Санкт-Петербург, Россия,  
a2807970@mail.ru,  
<https://orcid.org/0000-0003-4615-3179>.  
**Andrey N. Dmitriev**,  
Cand. Sci. (Eng.),  
Associate Professor of the Department of Well Drilling,  
Saint-Petersburg Mining University,  
Saint-Petersburg, Russia,  
a2807970@mail.ru,  
<https://orcid.org/0000-0003-4615-3179>.



**Васильев Николай Иванович**,  
доктор технических наук,  
старший научный сотрудник,  
Санкт-Петербургский горный университет,  
г. Санкт-Петербург, Россия.  
**Nikolay I. Vasiliev**,  
Dr. Sci. (Eng.),  
Senior Scientific Researcher,  
Saint-Petersburg Mining University,  
Saint-Petersburg, Russia.



#### **Вклад авторов / Contribution of the authors**

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

#### **Конфликт интересов / Conflict of interests**

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

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

#### **Информация о статье / Information about the article**

Статья поступила в редакцию 01.06.2021; одобрена после рецензирования 02.07.2021; принята к публикации 05.08.2021.

The article was submitted 01.06.2021; approved after reviewing 02.07.2021; accepted for publication 05.08.2021.



### Уважаемые авторы!

Требования к оформлению научных статей, изложенные ниже, разработаны редакцией журнала для того, чтобы помочь Вам предоставить все необходимые для публикации сведения и избежать наиболее распространенных ошибок.

1. Научный журнал «Науки о Земле и недропользование» принимает к публикации научные материалы в виде статей по следующим тематикам:

- геологическое строение месторождений полезных ископаемых;
- тектоника месторождений, рудных узлов, районов;
- минералогия и геохимия месторождений полезных ископаемых;
- генетические проблемы формирования месторождений полезных ископаемых и других геологических объектов;
- минералогия (металлогения): рудные зоны, районы, пояса, металлогенические карты;
- методы и методики поисков и разведки месторождений полезных ископаемых;
- экономическая оценка месторождений полезных ископаемых, правовые основы недропользования;
- физико-геологические модели месторождений полезных ископаемых;
- геоинформационные технологии в науках о Земле;
- технология и техника горно-буровых работ;
- технология и техника разработки месторождений полезных ископаемых;
- технология обогащения и переработки минерального сырья;
- геммология и технология художественной обработки минералов и горных пород;
- гидрогеология и инженерная геология;
- безопасность жизнедеятельности в горно-геологической отрасли;
- геоэкология.

2. Приоритетными для публикации являются статьи в области междисциплинарных и мультидисциплинарных исследований, а также результаты работ с использованием цифровых технологий.

3. Статьи принимаются на русском, английском, китайском и монгольском языках от авторов, работающих в российских и иностранных вузах, академических и отраслевых научно-исследовательских институтах, а также производственных горно-геологических организациях.

4. Статья сопровождается:

- электронными версиями всех документов (скан), в том числе: авторского заявления, заполненного и подписанного всеми соавторами статьи; авторского договора; акта экспертного заключения о возможности открытой публикации материалов; сведений обо всех авторах на русском и английском языках с указанием названия вуза, организации, учреждения, должности и структурного подразделения, наличия ученой степени, ученого звания, почтового и электронного адресов каждого автора статьи;
- цветными портретными фотографиями авторов на светлом фоне (деловой стиль) в хорошем качестве в формате \*.JPEG;
- по желанию автора в статье могут быть указаны его профили в системах цитирования и другие сведения (профили в РИНЦ, ORCID, Scopus, в других системах цитирования, можно предоставить ссылку на личную страницу в Интернете, включая страницы в социальных сетях).

*Обращаем Ваше внимание, что вся перечисленная выше информация публикуется в журнале в открытом доступе!*

5. Статьи принимаются ответственным секретарем в электронном виде в формате Microsoft Word для Windows по электронной почте [nzn@istu.edu](mailto:nzn@istu.edu). Шрифт – Times New Roman, размер шрифта – 12 (строки через 1 интервал), перенос слов – автоматический. Параметры страницы:





отступы сверху и снизу – 2,5 см, слева и справа – 2 см, абзацный отступ – 0,6 см, ориентация страницы – книжная.

6. Объем текста – от 10000 знаков, включая пробелы, иллюстрационный материал – до 6 рисунков.

7. Статьи должны быть структурированы и выполнены по международному стандарту IMRAD. Структура статьи: индекс УДК, название статьи, фамилия, имя, отчество авторов, название учреждения, где выполнена работа, аннотация и ключевые слова на языке оригинала (русском / китайском / монгольском) и английском языках, введение, цель исследования, материал и методы исследования, результаты исследования и их обсуждение, выводы или заключение, библиографический список и references, критерии авторства, конфликт интересов и сведения об авторах (вся информация предоставляется одним файлом, названным следующим образом: *Фамилия первого автора – Первые три-четыре слова названия.doc*).

8. Рекомендуемая длина названия статьи – до 100 знаков с пробелами. Название статьи должно быть лишено сокращений, аббревиатур, описывать содержание статьи точно и конкретно, при этом оно должно быть достаточно длинным, чтобы однозначно выразить главную идею статьи, и коротким настолько, чтобы ни одно слово нельзя было выбросить без потери смысла.

9. Аннотация должна отражать основную идею статьи, поскольку для большинства читателей она является главным источником информации о представленном исследовании. Объем аннотации – 1500–2000 знаков, примерная структура: цель, методы, предмет, объект и результаты исследования, выводы. Не следует ссылаться на таблицы и / или рисунки, приведенные в основном в тексте статьи, а также использованную литературу, поскольку аннотации также публикуются отдельно от статьи. Не используйте в аннотации сокращения, аббревиатуры, а также формулы, так как аннотации в большинстве баз данных, начиная с РИНЦ, публикуются в формате, исключающем отображение формул.

Ключевые слова должны отражать суть исследования, способствовать работе поисковых систем, по количеству не превышать 10 единиц, словосочетания – не более 3 единиц.

10. Формулы в тексте должны быть набраны в специальном редакторе формул. Все экспликации элементов формул необходимо также выполнять в редакторе формул.

11. Таблицы должны содержать только необходимые данные и представлять собой обобщенные и статистически обработанные материалы с указанием обозначения переменных. Каждая таблица снабжается заголовком. Формат таблиц – книжный, направление шрифта – по горизонтали.

12. Графические материалы к статье (рисунки и фотографии) представляются в минимальном количестве (не более 6 единиц) и должны быть выполнены в соответствии с требованиями к геологической графике. Выбирается масштаб, пригодный для тиражирования, а размер – не более 170×245 мм. Графические материалы должны допускать перемещение в тексте и возможность изменения размеров. Каждый рисунок сопровождается надписями в содержательной части и подрисуночной подписью, в которой представляется объяснение всех его элементов. Названия рисунков и подрисуночные подписи должны быть максимально краткие, основная информация предоставляется в тексте.

13. Ссылки на литературные источники приводятся в квадратных скобках в порядке возрастания. Библиографический список формируется по мере упоминания источников в тексте. Рекомендуемое количество источников в библиографическом списке – не менее 20, из них не менее 5 ссылок на статьи из иностранных журналов. При этом самоцитирование автора не должно превышать 25 % от общего количества источников и полностью исключается самоцитирование журнала. Не допускаются ссылки на законы, государственные стандарты, положения, диссертации и авторефераты, учебники и учебные пособия, справочники, словари и энциклопедии, а также геологические карты. При необходимости обращения к этим источникам ссылку на них следует размещать в подстрочной сноске. Редакционная коллегия рекомендует в списке



литературы ссылаться на статьи из журналов, входящих в международные базы данных по глобальным индексам цитирования (Scopus, Web of Science и другие).

14. Список литературы составляется в двух вариантах. В библиографическом описании статьи необходимо указывать всех авторов. Первый вариант (библиографический список) оформляется на языке источника в соответствии с ГОСТ Р 7.0.5 2008. Второй вариант (references) оформляется в виде транслитерации русского текста в латиницу с переводом на английский язык и служит для отслеживания цитируемости авторов. Примеры оформления источников в списках можно посмотреть на нашем сайте в разделе «Требования к статьям».

15. При подаче статьи авторами предоставляются на английском языке следующие элементы работы: название статьи, сведения об авторах, аннотация, ключевые слова, благодарности, названия таблиц и подрисуночные подписи, библиография.

16. Авторы статей должны придерживаться обязанностей, предусмотренных «Редакционной политикой журнала».

17. Редакция оставляет за собой право отклонять статьи, не отвечающие указанным требованиям. Поступающие в редакцию материалы возврату не подлежат.

18. Редакция оставляет за собой право на научное и литературное редактирование статей с последующим согласованием с авторами.

19. Представленные статьи проходят проверку на наличие заимствований.

20. Журнал выпускается с периодичностью 4 номера в год.

**Внимание! Публикация статей является бесплатной.**

*Мы приглашаем Вас к участию в нашем проекте в качестве авторов, рекламодателей и читателей.*

По вопросам публикации обращаться по адресу: 664074, Россия, г. Иркутск, ул. Лермонтова, 83, Иркутский национальный исследовательский технический университет, редколлегия, ауд. Е-317.

Главный редактор Лобацкая Раиса Моисеевна, тел.: +7 (3952) 405115, e-mail: lobatskaya@gmail.com

Заместитель главного редактора Аузина Лариса Ивановна, тел.: +7 (3952) 405108, e-mail: lauzina@mail.ru

Заместитель главного редактора Красноштанов Сергей Юрьевич, тел.: +7 (3952) 405101, e-mail: geo\_info@istu.edu

Статьи следует направлять через личный кабинет на сайте [www.nznj.ru](http://www.nznj.ru) или ответственному секретарю Храмовских Виталию Александровичу по электронной почте [nzn@istu.edu](mailto:nzn@istu.edu); тел.: +7 (3952) 405069, адрес: 664074, Россия, г. Иркутск, ул. Лермонтова, 83, ауд. Ж-04.



Образец оформления статьи

УДК 549.09

## Минералого-технологические типы руд Томинского месторождения меди (Южный Урал)

Елена Михайловна Курчевская, Марина Владиславовна Яхно<sup>b</sup>,  
Аркадий Евгеньевич Сенченко<sup>c</sup>

<sup>a,c</sup>НИИПИ «Технологии обогащения минерального сырья», г. Иркутск, Россия

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

Автор, ответственный за переписку: Яхно Марина Владиславовна, ymar@istu.edu

**Резюме:** Цель. Цель данного исследования заключается в изучении технологических типов руд Томинского месторождения меди, а также минерального состава вмещающих пород и руд каждого из трех типов, выявлении минералогических и структурно-текстурных особенностей руд, выявлении взаимосвязи изменения рудной минерализации и степени метаморфизма для каждого типа руд. **Методы.** Рудные тела Томинского медно-порфирового месторождения, залегающие в диоритах и кварцевых диоритах, представляют собой прожилковые и прожилково-вкрапленные скопления в зонах дробления. На месторождении широко развиты метасоматиты кварц-серicitовой формации. Изучение типов руд проводилось с использованием микроскопов. **Результаты.** В результате выделено три геолого-технологических типа руд в пределах Томинского месторождения. Первый тип представлен первичными сульфидными рудами, которые наблюдаются в среднем ниже глубины 50–55 м. По составу это хлорит-мусковит-кварцевые метасоматиты. Вмещающие породы представлены серицитизированными, хлоритизированными и карбонатизированными диоритами. В составе руд преобладают халькопирит и пирит. Практически вся медь содержится в халькопирите. Второй тип – это рудные зоны вторичного сульфидного обогащения. Этот тип сложен первичными и вторичными сульфидами меди. Все породы аргиллизированные и представлены метасоматитами различного состава. Все виды пород несут в себе рудную минерализацию. К третьему типу относятся окисленные руды, которые образуют зону окисления месторождения. Они делятся на три подтипа: глинистые, глинисто-щебнистые и щебнистые руды. Глинистые руды залегают в самых верхних частях коры выветривания, глинисто-щебнистые руды слагают центральную ее часть, а руды в щебнистых образованиях отмечены в нижних горизонтах. Представлено петрографическое описание каждого из типов. Выявлены минералогические и структурно-текстурные особенности руд. В результате изучения петрографического состава каждого типа руд установлена различная степень метаморфизма и вследствие этого – изменение рудной минерализации. **Выводы.** Прослеживается влияние метасоматических процессов, изменивших строение и минеральный состав руд. Для первого типа руды характерно наличие первичных пород – диоритов с насыщенной сульфидной вкрапленностью и с незначительными метасоматическими изменениями. В зоне вторичного обогащения породы претерпели интенсивное метасоматическое изменение. Породы этой зоны насыщены гидроксидами железа. Для зоны интенсивного выветривания характерны глинистые и хлоритизированные породы. Рудная минерализация представлена исключительно окисленными минералами. Сульфиды единичны. Различия в минеральном составе трех типов руд влияют на выбор способов переработки руды в пределах Томинского месторождения.

**Ключевые слова:** Томинское месторождение, медно-порфировое оруденение, метаморфизм, технологические типы руд

**Финансирование:**

**Благодарности:**

## Mineralogical and technological types of Tominskoye deposit copper ores (Southern Ural)

Elena M. Kurchevskaya<sup>a</sup>, Marina V. Yakhno<sup>b</sup>, Arkady Y. Senchenko<sup>c</sup>

<sup>a,c</sup>NIPI TOMS (Scientific Research and Design Institute "Technologies of Minerals Separation"), Irkutsk, Russia

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

Corresponding author: Marina V. Yakhno, ymar@istu.edu

**Abstract. Purpose.** The purpose of the article is investigation of the technological types of Tominskoye copper deposit ores; examination of the mineral composition of the host rocks and ores of each of the three types; identification of mineralogical and structural-textural features of ores, research of the relationship of mineralization and metamorphism intensity alteration for each type of ore. **Methods.** Ore bodies of the Tominskoye porphyry copper deposit occurring in the diorites and quartz diorites are veinlet and porphyry-stringer clusters in crush zones. The deposit is characterized with the predominant metasomatic rocks of quartz-sericite formation. **Results.** Three geological and technological ore types are distinguished within the Tominskoye field. The first type is represented by primary sulfide ores, which occur on average lower than 50–55 m depth. By composition they are chlorite-muscovite-quartz metasomatic rocks. The host rocks are represented by sericitized, chloritized and carbonated diorites. Chalcopyrite and pyrite are predominant elements in ore compo-



sition. Chalcopryite contains carbonated diorites. Chalcopryite and pyrite are predominant elements in ore composition. Chalcopryite contains almost all of the copper. The second type includes the ore zones of secondary sulfide concentration. This type is composed of primary and secondary copper sulfides. All the rocks are dirty argillaceous and are represented by metasomatic rocks of different composition. All types of rocks feature ore mineralization. The third type covers oxidized ores, which form the oxidation zone of the deposit. They are divided into three subtypes: clay, claydetrital and detrital ores. Clay ores occur in the uppermost parts of the crust of weathering. Clay-detrital ores compose its central part, while ores in detrital formations have been found in the lower horizons. Each of the type is given a petrographic description. Mineralogical and structural-textural features of ores are identified. The study of the petrographic composition of each type of ores showed a varying degree of metamorphism that resulted in changes in ore mineralization. **Conclusions.** The influence of metasomatic processes is indicated. The last have changed the structure and mineral composition of ores. The presence of primary rocks – diorites with saturated sulfide impregnation and insignificant metasomatic alterations is typical for the first type of ore. The rocks in the zone of secondary concentration have undergone intense metasomatic alteration. These rocks are saturated with iron hydroxides. The presence of clay and chloritized rocks characterize the zone of intense weathering. Ore mineralization is represented exclusively by oxidized minerals. Sulfides are rare. Variations in the mineral composition of the three types of ores influence the choice of ore processing methods at Tominskoye ore deposit.

**Keywords:** Tominskoye field, porphyry copper mineralization, metamorphism, technological ore types

**Funding:**

**Acknowledgements:**

Далее идут **текст статьи** (в виде: введение, цель исследования, материалы и методы исследования, результаты исследования и их обсуждение, заключение), **список источников** (references), **вклад авторов** (contribution of the authors) и **конфликт интересов** (conflict of interests).

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

Фото  
автора

**Курчевская Елена Михайловна,**  
старший научный сотрудник,  
НИИПИ «Технологии обогащения минерального сырья»,  
г. Иркутск, Россия,  
kurchevskaya@tomsgroup.ru,  
ORCID.

**Elena M. Kurchevskaya,**  
Senior Researcher,  
Scientific Research and Design Institute “Technologies of Minerals Separation”,  
Irkutsk, Russia,  
kurchevskaya@tomsgroup.ru,  
ORCID.

Фото  
автора

**Яхно Марина Владиславовна,**  
старший преподаватель кафедры геологии и геохимии полезных ископаемых,  
Иркутский национальный исследовательский технический университет,  
г. Иркутск, Россия,  
ymar@istu.edu,  
ORCID.

**Marina V. Yakhno,**  
Senior Lecturer of the Department of Geology and Geochemistry of Minerals,  
Irkutsk National Research Technical University,  
Irkutsk, Russia,  
ymar@istu.edu,  
ORCID.

Фото  
автора

**Сенченко Аркадий Евгеньевич,**  
генеральный директор,  
НИИПИ «Технологии обогащения минерального сырья»,  
г. Иркутск, Россия,  
senchenko@tomsgroup.ru,  
ORCID.

**Arkady E. Senchenko,**  
CEO,  
Scientific Research and Design Institute “Technologies of Minerals Separation”,  
Irkutsk, Russia,  
senchenko@tomsgroup.ru,  
ORCID.

# НАУКИ О ЗЕМЛЕ И НЕДРОПОЛЬЗОВАНИЕ

12+

Научный журнал

Том 44 № 3 (76) 2021

Дизайнер А. А. Хохряков  
Редактор Ф. А. Посысоева  
Перевод на английский язык В. В. Батицкой  
Компьютерная верстка Ф. А. Посысоевой

Издание распространяется бесплатно

Выход в свет 29.09.2021 г. Формат 60×90/8.  
Бумага офсетная. Печать цифровая. Усл. печ. л. 19,75.  
Тираж 500 экз. Зак. 137а. Поз. плана 4н.

Отпечатано в типографии Издательства  
ФГБОУ ВО «Иркутский национальный  
исследовательский технический университет»,  
адрес типографии: 664074, Россия, г. Иркутск, ул. Лермонтова, 83а

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