



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

НАУКИ О ЗЕМЛЕ И НЕДРОПОЛЬЗОВАНИЕ

Том
Vol. 44 № 4 2021

EARTH SCIENCES AND SUBSOIL USE

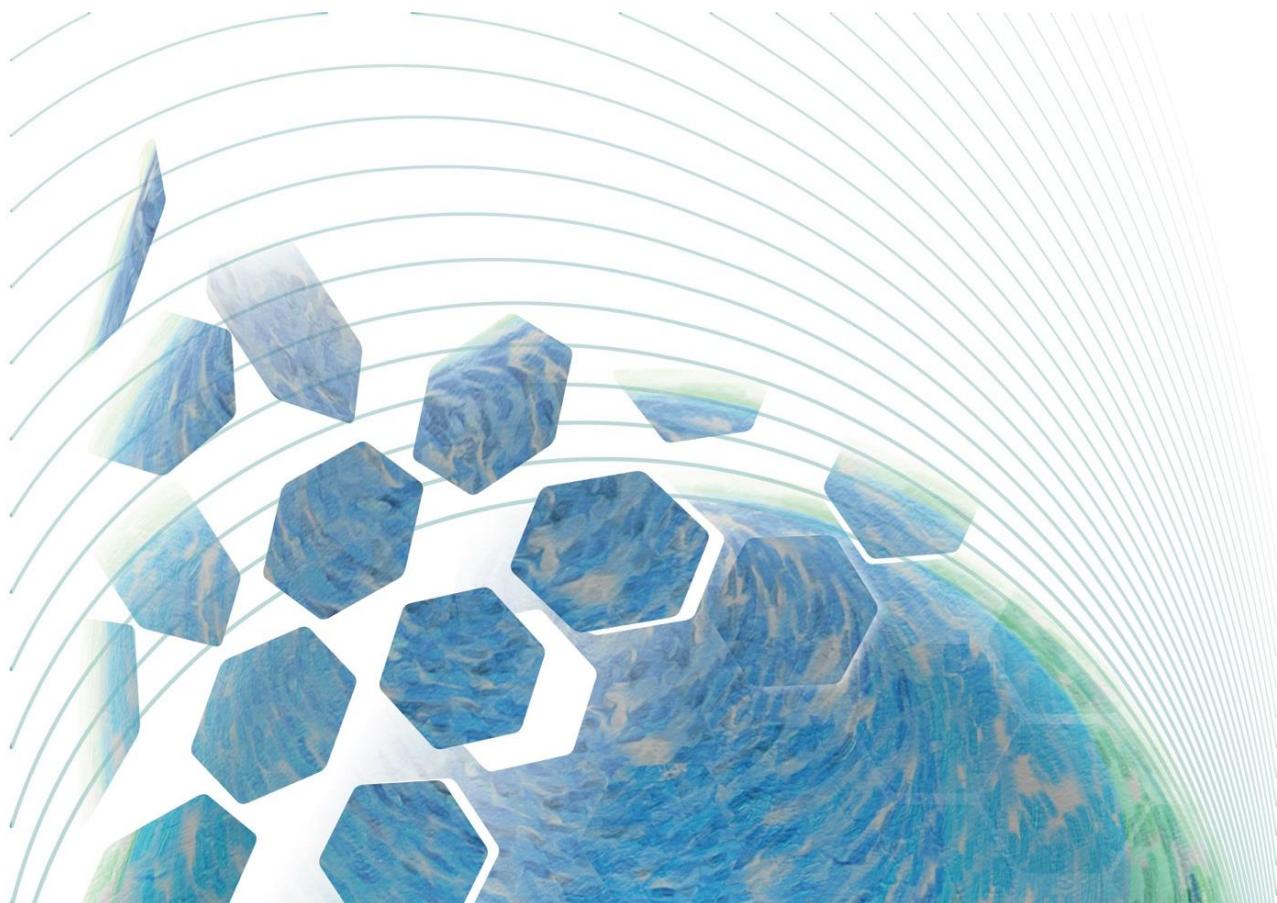
ISSN 2686-9993 (print)
ISSN 2686-7931 (online)

НАУКИ О ЗЕМЛЕ И НЕДРОПОЛЬЗОВАНИЕ

Том 44 № 4 2021
Vol. 44 № 4 2021

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)
Гладкоуб 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, рассыпается в Российскую книжную палату, ВИНИТИ РАН. Журнал включен в научную электронную библиотеку CyberLeninka, в базы данных открытого доступа DOAJ, OAII, в международный каталог периодических изданий Ulrich's Periodicals Directory, в базу данных EBSCO. Журнал распространяется по подписке в каталоге агентства ЗАО ИД «Экономическая газета» «Объединенный каталог Прессы 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)

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

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

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

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

Chairman of the Editorial Council

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

Editorial Board

Editor-in-Chief

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

Deputy 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, OAII (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.....	354
Колонка главного редактора.....	356
Геология, поиски и разведка месторождений полезных ископаемых	
Тальгамер Б. Л. Иркутской школе горных инженеров – 90 лет.....	358
Турутанов Е. Х., Канайкин В. С. Структура Эрдэнэтского рудного района по гравиметрическим данным.....	369
Харитонов А. Л. Геолого-геофизические исследования российской Арктики для поисков новых нефтегазовых регионов.....	382
Геоинформатика	
Дин Вэньлун, Цзэн Вэйтэ, Ван Жуюэ, Цзю Кай, Ван Чжэ, Сунь Ясион, Ван Синхуа. Моделирование поля тектонических напряжений и прогноз распределения трещин в сланцевом коллекторе.....	397
Шакирова Э. В., Александров А. А., Семыкин М. В. Разработка новой эмпирической корреляции для прогнозирования объемного коэффициента пластовой нефти с использованием методов искусственного интеллекта.....	408
Линь Луцзинь, Чэн Хуй, Пан Чжэньшань, Чэн Чжичжун, Сюе Цзяньлин, Тао Вэнь, Ма Исин, Гун Линмин, Шэнь Хунтао. Модель прогнозирования поисково-разведочных работ на меднорудном месторождении Хойли в провинции Сычуань, Китай.....	417
Разведка и разработка месторождений полезных ископаемых	
Мельников А. П., Буглов Н. А. Обоснование параметров наддолотного струйного насоса для вскрытия продуктивного пласта.....	433
Чебан А. Ю. Применение усовершенствованного добычного комплекса для открытой разработки рудных месторождений.....	441
Ламбин А. И. Исследование совместного влияния некоторых факторов на очистку ствола скважины.....	448
Гидрогеология и инженерная геология	
Козырева Е. А., Рыбченко А. А., Дэмбэрэл С. Морфометрический анализ для выявления особенностей формирования паводковых потоков (на примере Улан-Баторской агломерации)..	458
Геоэкология	
Радомская В. И., Радомский С. М., Сегренев А. С., Кулик С. Я. Загрязнение бассейна реки Джелтулак-1 при россыпной золотодобыче (Амурская область).....	471
Экзарьян В. Н., Ахмадиев А. К. Проблемы и вопросы охраны природной среды при освоении углеводородных ресурсов в Мировом океане.....	485
Краткая информация о новых публикациях	
Кузьмин М. И., Ярмолюк В. В. Геологическая история Земли – от зарождения до наших дней.....	496
К сведению авторов.....	504



CONTENTS

Contents.....	355
---------------	-----

Chief Editor's Column.....	357
----------------------------	-----

Geology, Prospecting and Exploration of Mineral Deposits

Talgamer B. L. Irkutsk school of mining engineers is celebrating 90 th anniversary.....	358
Turutanov E. K., Kanaykin V. S. Structure of the Erdenet ore district according to gravimetric data.....	369
Kharitonov A. L. Geologic and geophysical exploration of the Russian Arctic in search for new oil and gas regions.....	382

Geoinformatics

Ding Wenlong, Zeng Weite, Wang Ruyue, Jiu Kai, Wang Zhe, Sun Yaxiong, Wang Xinghua. Simulation of tectonic stress field and prediction of fracture distribution in shale reservoir.....	397
Shakirova E. V., Aleksandrov A. A., Semykin M. V. Development of a new empirical correlation for predicting formation volume factor of reservoir oil using artificial intelligence.....	408
Lin Lujun, Chen Hui, Pang Zhenshan, Cheng Zhizhong, Xue Jianling, Tao Wen, Ma Yixing, Gong Lingming, Shen Hongtao. The ore prospecting prediction model for the Huili copper orefield in Sichuan Province, China.....	417

Exploration and Development of Mineral Deposits

Melnikov A. P., Buglov N. A. Parameter substantiation of supra bit jet pump for productive formation opening.....	433
Cheban A. Yu. Application of an improved mining complex for opencast mining of ore deposits..	441
Lambin A. I. Studying joint influence of a number of factors on borehole cleaning.....	448

Hydrogeology and Engineering Geology

Kozyreva E. A., Rybchenko A. A., Demberel S. Morphometric analysis for flood flow formation feature identification (on example of Ulaanbaatar agglomeration).....	458
---	-----

Geocology

Radomskaya V. I., Radomskiy S. M., Segrenev A. S., Kulik S. Ya. Contamination of the Dzheltulak-1 river basin under alluvial gold mining (the Amur region).....	471
Ekzaryan V. N., Akhmadiev A. K. Challenges and environmental issues in developing hydrocarbon resources in the World ocean.....	485

Brief Information about New Publications

Kuzmin M. I., Yarmolyuk V. V. Geological history of the Earth – from its formation to the present day.....	496
--	-----

Information for the Authors.....	504
----------------------------------	-----



Добрый день, дорогие наши читатели и авторы!



Перед вами завершающий выпуск 2021 года. Это всегда повод подводить некоторые итоги и строить планы на будущее. Как и в прежние годы, в нынешнем году тематика статей журнала охватывала широкий спектр проблем, касающихся различных аспектов геологической науки: от поисков и разведки месторождений полезных ископаемых, построения геоинформационных моделей и использования возможностей искусственного интеллекта до решения актуальных задач геофизики, техники и технологии разведки. За многие годы сложилась устойчивая практика освещения геологических проблем Сибири и Дальнего Востока, а также территорий наших ближайших соседей – Китая и Монголии. Весь год мы продолжали публиковать статьи своих зарубежных коллег на английском и монгольском языках, что позволило существенно расширить географию охвата территорий, круг геологических проблем и специалистов, интересующихся работами авторов нашего журнала.

Не оставались вне поля нашего внимания юбилейные и памятные даты выдающихся исследователей, мы публиковали наиболее интересные научные материалы крупных конференций, освещали выход в свет неординарных обобщающих монографий. В текущем номере журнала, в свою очередь, вы сможете познакомиться не только с чрезвычайно глубокими статьями, базирующимиися на современных методах геологической науки и практики, но и с анализом результатов 90-летней деятельности старейшей в Иркутске кафедры по подготовке горных инженеров, а также с основным содержанием монографии большого научного коллектива, отражающей нетрадиционный взгляд на зарождение и развитие планеты Земля.

Накануне наступающего Нового года редакция шлет всем вам поздравления и благодарит авторов за интересные проблемные статьи, рецензентов – за вдумчивый, профессиональный анализ материалов, помогающий нам поддерживать высокий содержательный уровень журнала и обсуждать наиболее современные идеи. Мы желаем всем вам нескучных геологических маршрутов, плодотворной работы, огромных творческих успехов в науке и, разумеется, счастья: светлого, теплого, разного – такого, каким оно представляется каждому из вас в личных мечтах, чаяниях и надеждах!

**Лобацкая Раиса Моисеевна,
главный редактор**



From the Editor

Dear Readers and Authors,

We are happy to present you the final issue of 2021. This is the reason to look back of the year and make plans for the future. This year, similar to the previous ones, the subject area of the articles published in the journal covered a wide range of problems dealing with the various aspects of geological science: from prospecting and exploration of mineral deposits, building geoinformation models and making use of artificial intelligence potential to solving relevant problems of geophysics, engineering and exploration technology. Over the past years, the journal kept on covering the geological problems of Siberia and the Far East, and the territory of our closest neighbors, China and Mongolia as well. Throughout the year we continued to publish the articles of our foreign colleagues in English and Mongolian, which made it possible to significantly expand the geography of the territories discussed, the range of geological problems involved and the number of specialists interested in the works of the journal contributors.

We paid tribute to the anniversaries and memorable dates of outstanding researchers, published the most noteworthy scientific materials of major conferences, and related to the publications of challenging generalizing monographs. In its turn, the current issue of the journal contains not only in-depth articles based on the modern methods of geological science and practice, but also the analysis of the results of 90-year activity of the oldest Irkutsk department engaged in training of mining engineers. You can also get acquainted with the main content of the monograph of a large scientific team that reflects an unconventional view of the origin and development of the Earth.

In the run up to New Year the editorial board are wishing you very happy holidays and thanking the contributors for interesting topical articles, reviewers for thoughtful, professional analysis of materials, which helped us maintain a high content level of the journal and discuss the most relevant ideas. We wish you exciting geological routes, fruitful work, thumping scientific success and, of course, happiness: light, warm and different – that of the very personal kind that everyone is longing for in one's dreams, aspirations and hopes!

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



ГЕОЛОГИЯ, ПОИСКИ И РАЗВЕДКА МЕСТОРОЖДЕНИЙ ПОЛЕЗНЫХ ИСКОПАЕМЫХ

Научная статья

УДК 378.1:622:001.8

<https://doi.org/10.21285/2686-9993-2021-44-4-358-368>

Иркутской школе горных инженеров – 90 лет

Борис Леонидович Тальгамер^a^aИркутский национальный исследовательский технический университет, г. Иркутск, Россия

Резюме. Подготовка горных инженеров в Восточной Сибири началась в 1930 г. в Сибирском горном институте (в настоящее время Иркутский национальный исследовательский технический университет). В 1931 г. была создана кафедра горного искусства, которая впоследствии стала называться кафедрой разработки месторождений полезных ископаемых. За прошедший период данной кафедрой было подготовлено более семи тысяч выпускников – горных инженеров, которые в значительной степени определили развитие горной промышленности в Иркутской области, соседних регионах России, а также в Монголии. Для Монголии кафедрой подготовлено более ста горных инженеров и магистров, преподавателям Монгольского политехнического института (ныне Монгольский университет науки и технологии) оказана помощь в организации учебного процесса по подготовке специалистов для горной промышленности страны. На разных этапах становления кафедры разработки месторождений полезных ископаемых ею руководили известные ученые-горняки, создавшие три научных школы по разработке угольных, россыпных и золоторудных месторождений, по результатам исследований которых было присуждено две Государственных премии Российской Федерации, защищено несколько десятков докторских и кандидатских диссертаций, получено около ста патентов на изобретения. В настоящее время кафедра руководит подготовкой горных инженеров по открытой и подземной разработке месторождений полезных ископаемых, выполняет большой объем научно-исследовательских и проектных работ по заказам горных предприятий, ведет подготовку научно-педагогических кадров, разрабатывает новые технологии и технические решения по совершенствованию горных работ. Кафедра активно сотрудничает с горнодобывающими предприятиями, научно-исследовательскими и проектными организациями, а также вузами, осуществляющими подготовку горных инженеров.

Ключевые слова: подготовка горных инженеров, кафедра, научно-исследовательские работы, выпускники, научные кадры

Для цитирования: Тальгамер Б. Л. Иркутской школе горных инженеров – 90 лет // Науки о Земле и недропользование. 2021. Т. 44. № 4. С. 358–368. <https://doi.org/10.21285/2686-9993-2021-44-4-358-368>.

GEOLOGY, PROSPECTING AND EXPLORATION OF MINERAL DEPOSITS

Original article

Irkutsk school of mining engineers is celebrating 90th anniversary

Boris L. Talgamer^a^aIrkutsk National Research Technical University, Irkutsk, Russia

Abstract. It is in 1930 that the training of mining engineers began in Eastern Siberia on the basis of the Siberian Mining Institute (now Irkutsk National Research Technical University). In 1931 the Department of Mining Arts was organized, which later was named the Department of Mineral Deposits Development. Over the years, the Department has trained more than 7000 graduates – mining engineers, who made a huge contribution in the development of the mining industry in the Irkutsk region and neighboring territories including Mongolia. The Department has trained more than a hundred mining engineers and Masters of science for Mongolia; assisted the lecturers and professors of the Mongolian Polytechnic University (now Mongolian University of Science and Technology) in organizing the educational process for training specialists for the country's mining industry. At its different formation stages the Department of Mineral Deposits Development was headed by well-known scientists – mining engineers, who created three scientific schools for the development of coal, placer and gold deposits; the obtained scientific results were marked with two State awards of the Russian Federation, dozens of doctoral and candidate dissertations were defended and about 100 patents were received. Today, the Department super-

© Тальгамер Б. Л., 2021



vises the training of mining engineers in open-pit and underground mining of mineral deposits, carries out a large amount of research and design work on the orders from mining enterprises, trains academic staff, develops new technologies and technical solutions in order to improve mining operations. The Department is deeply involved in the cooperation with mining enterprises, research and design organizations, as well as with universities that train mining engineers.

Keywords: training of mining engineers, department, research works, graduates, scientific personnel

For citation: Talgamer B. L. Irkutsk school of mining engineers is celebrating 90th anniversary. *Nauki o Zemle i nedropol'zovanie = Earth sciences and subsoil use.* 2021;44(4):358-368. (In Russ.). <https://doi.org/10.21285/2686-9993-2021-44-4-358-368>.

Начавшееся в 1930-е гг. крупномасштабное осуществление программы по вовлечению минеральных богатств Сибири в экономический потенциал страны при острой нехватке на местах инженеров-горняков предопределило необходимость организации на востоке страны высшего горного образования. Постановление правительства об открытии в Иркутске вуза горного профиля было принято в марте 1930 г., и в этом же году Сибирский горный институт (впоследствии название учебного заведения несколько раз менялось и в настоящее время звучит как Иркутский национальный исследовательский технический университет) осуществил набор первых студентов.

В первый (1930/1931-й) учебный год в институте проходил организационный процесс, в результате которого в июне 1931 г. (приказ № 61 от 17 июня 1931 г.) были созданы первые пять кафедр: механики и математики, химии, геологии и разведочного дела, горного искусства и социально-экономическая.

Кафедра горного искусства, которая впоследствии стала называться кафедрой разработки месторождений полезных ископаемых (РМПИ), обеспечивала проведение занятий по следующим дисциплинам: разработка руд, разработка россыпей, специальные отделы горного искусства. Заведующим был назначен профессор Г. В. Ключанский. На данную кафедру была возложена задача подготовки инженерных кадров для золотодобывающей промышленности территорий, специализирующихся на разработке рудных и россыпных месторождений, таких как Сибирь, Дальний Восток и Крайний Север. Подготовка кадров для угледобывающих предприятий в этот период, в свою очередь, была возложена на Черемховский горных техникум (ныне Черемховский горнотехнический колледж им. М. И. Шадова), который был создан практически одновременно с Сибирским горным институтом в 1930 г.

Первые три факультета в Сибирском горном институте были созданы лишь в 1933 г. (приказ № 225 от 11 октября 1933 г.), при этом геологоразведочный и металлургический факультеты не имели каких-либо подразделений, а горный факультет включал кафедру разработки россыпей и кафедру разработки рудных месторождений (горного искусства) с подготовкой инженеров по двум специальностям – россыпной и рудной. К концу 1933 г. в институте было уже семнадцать кафедр, в том числе восемь специальных.

На первом этапе развития кафедры горного искусства значительный вклад в организацию учебно-методической работы внес горный инженер (затем кандидат технических наук, доцент, а позднее доктор технических наук, профессор) А. И. Марков, проработавший заведующим кафедрой (с некоторыми перерывами) до 1955 г. В 1934 г. состоялся первый выпуск 8 горных инженеров. В следующем году было выпущено уже 54 специалиста. За первое десятилетие кафедрой было подготовлено 344 инженера по разработке рудных и россыпных месторождений, подавляющее большинство которых, как отмечалось в приветственной телеграмме наркома цветной металлургии СССР, успешно работало в промышленности Сибири и Дальнего Востока.

Подготовку горных инженеров неразрывно сопровождала активная научная деятельность сотрудников кафедры. С первых лет существования коллектив кафедры помогал горнодобывающим предприятиям Сибири разрешать сложнейшие вопросы производства. Научные исследования в области разработки россыпей возглавил профессор А. П. Свиридов. По результатам выполненных научно-исследовательских работ в 1935 г. им была опубликована монография «Драгостроение и драгирование золота и платины», ставшая первым справочником для производ-



ственников и учебным пособием для студентов и преподавателей горных вузов страны. Под руководством А. И. Маркова выполнен ряд научно-исследовательских работ, связанных с совершенствованием технологий подземной разработки рудных и россыпных месторождений.

В годы Великой Отечественной войны кафедрой РМПИ было подготовлено 127 инженеров по разработке рудных и россыпных месторождений. Коллектив кафедры за военные годы выполнил значительный объем научно-исследовательских работ по заказам промышленных предприятий, в том числе работавших на оборону. По результатам выполненных исследований заведующий кафедрой РМПИ А. И. Марков в 1943 г. защитил кандидатскую диссертацию.

В послевоенные годы профессорско-преподавательский состав кафедры пополнился новыми сотрудниками. В 1948 г. на кафедру прибыли кандидаты технических наук Б. Н. Болотов и Ю. Б. Галата. В 1946 г. после демобилизации из рядов Советской Армии на кафедру РМПИ прибыл ее выпускник Л. А. Шелест, начавший свою педагогическую деятельность ассистентом, а затем, после защиты диссертации, работавший доцентом и заведующим кафедрой.

С 1947 г. работу на кафедре начал доцент В. И. Тяжелов, в 1949 г. – профессор В. А. Кудряшев. В 1956 г. после окончания аспирантуры в Институте горного дела Академии наук Казахской ССР на кафедру прибыл кандидат технических наук Л. М. Радченко – основатель Лаборатории физики горных пород, позднее избравшийся на должность декана факультета. В 1959 г. после окончания аспирантуры Московского горного института на горном факультете приступил к работе кандидат технических наук А. И. Ляхов, позднее избравшийся на должность декана, а также на кафедру РМПИ возвратился ее выпускник В. Т. Сорокин.

Политика института в послевоенные годы позволила существенно пополнить профессорско-преподавательский состав кафедры РМПИ квалифицированными научно-педагогическими кадрами, что заметно повысило уровень учебной, воспитательной и учебно-

методической работы, расширило диапазон научной и практической значимости выполняемых исследований. Результаты цикла выполненных научно-исследовательских работ, связанных с совершенствованием технологий разработки россыпных и оловорудных месторождений, послужили основой для подготовки и защиты сотрудниками кафедры докторских и кандидатских диссертаций.

Под руководством профессора А. П. Свиридова продолжались исследования по совершенствованию технологии и организации дражной разработки россыпных месторождений. Они были обобщены в изданной им в 1952 г. монографии «Драги и драгирование», допущенной Министерством высшего образования СССР в качестве учебного пособия для горных вузов и не утратившей своего научно-прикладного значения до сих пор.

В 1949 г. под руководством профессора А. П. Свиридова была открыта аспирантура. Первыми аспирантами стали выпускники В. А. Кудряшев (позднее доктор технических наук, профессор, заведующий кафедрой разработки россыпных месторождений) и М. И. Баканов (позднее доцент, кандидат технических наук, впоследствии ректор Иркутского института народного хозяйства).

В том же 1949 г. кафедра РМПИ была разделена на три самостоятельных подразделения, но после в 1955 г. она вновь объединилась под тем же названием. Основные вехи развития кафедры можно проследить на рис. 1.

В 1952 г. кафедрой РМПИ был осуществлен первый выпуск горных инженеров, специализирующихся на открытой разработке угольных и рудных месторождений. Регулярная подготовка горных инженеров по открытой разработке месторождений началась в Иркутске кафедрой РМПИ с 1953 г., когда на эти специальности были набраны две группы студентов, а в Черемхово – с 1960 г. Таким образом, систематический выпуск горных инженеров по открытым горным работам начался с 1958 г. Несмотря на явную необходимость, кафедра технологии и комплексной механизации открытых горных работ (ТКМО) была создана в Иркутском политехническом институте только в 1966 г. (см. рис. 1).

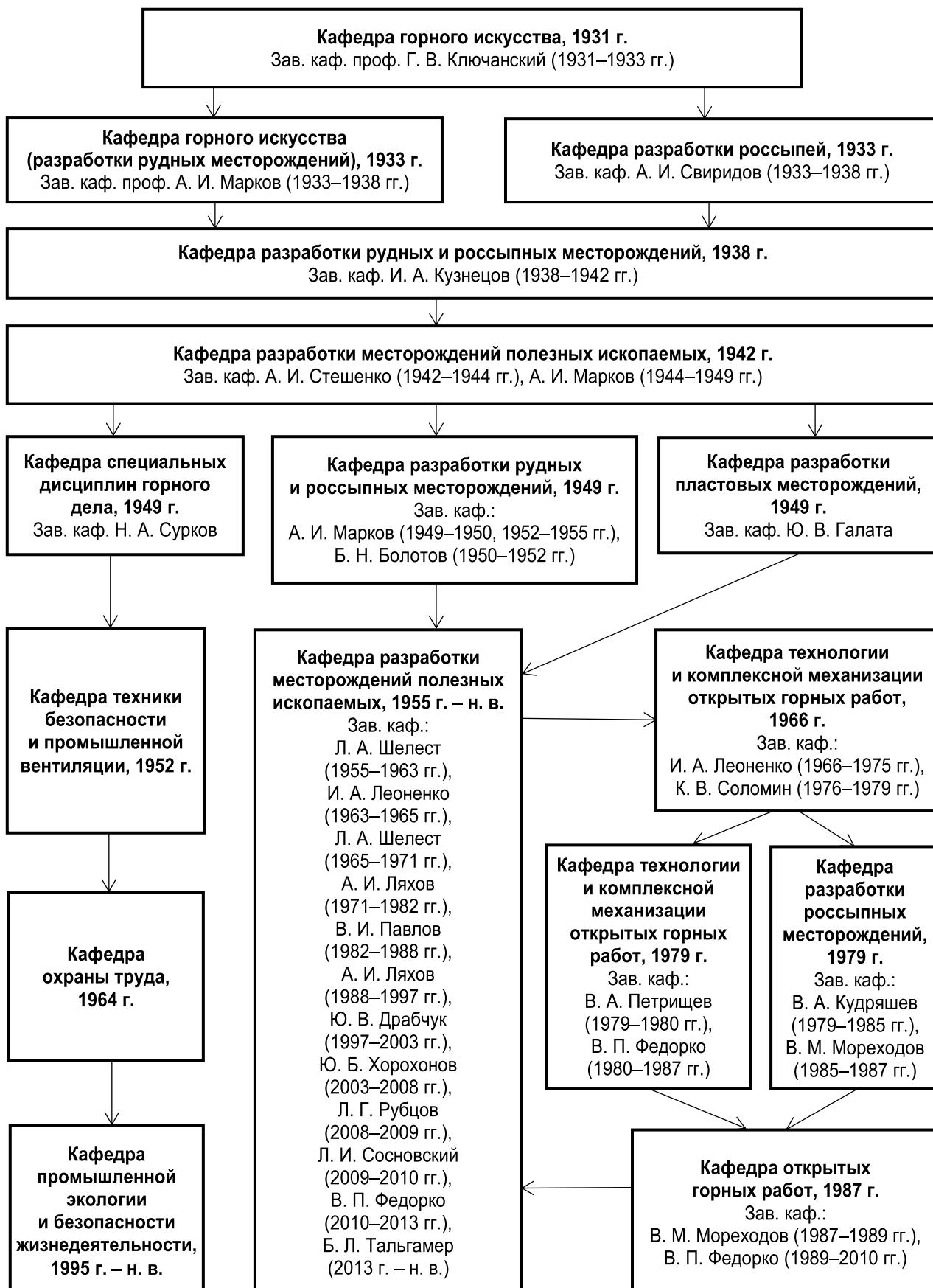


Рис. 1. Этапы становления и развития кафедры разработки месторождений полезных ископаемых
Fig. 1. Formation stages of the Department of Mineral Deposits Development



К моменту организации Политехнического института (1960 г.) и переезда всех его подразделений в новые учебные корпуса кафедре РМПИ были выделены соответствующие площади, что позволило создать необходимую учебно-исследовательскую лабораторную базу, оснащенную современным оборудованием. Были введены в эксплуатацию учебно-исследовательская Лаборатория физики горных пород (научный руководитель доцент Л. М. Радченко), а также единственная на тот момент в Восточной Сибири Лаборатория взрывных работ (руководитель доцент В. Т. Сорокин).

К 30-летию горного факультета (1930–1960 гг.) кафедрой РМПИ было подготовлено 1517 инженеров по разработке месторождений полезных ископаемых. В этот период значительно возрос объем научно-исследовательских работ, выполняемых по заказам предприятий, тематика которых включала изыскание рациональных путей повышения эффективности разработки месторождений полезных ископаемых, а также комплексное исследование физико-механических свойств горных пород.

С 1961 г. на кафедре началась подготовка инженерных кадров для горнодобывающей промышленности Монголии. С 1975 г. коллектив кафедры РМПИ принимал участие в международной программе исследований по совершенствованию технологии горных работ и улучшению условий труда на горных предприятиях Монголии.

В Монголию в разное время для чтения цикла лекций по вопросам современного состояния технологии подземной и открытой разработки месторождений полезных ископаемых, исследования физико-механических свойств горных пород и разработки проектов эксплуатации месторождений выезжали преподаватели Л. М. Радченко, А. И. Ляхов, В. Т. Сорокин, В. П. Федорко, Б. Л. Тальгамер, Л. Г. Рубцов, Ю. Б. Хорохонов и другие. Преподавателям Монгольского политехнического института (ныне Монгольский университет науки и технологии) была оказана методическая помощь в составлении учебных пособий по курсовому и дипломному проектированию. Оказывалась также научно-методическая помощь

сотрудникам кафедры горного дела Монгольского политехнического института, работающим над кандидатскими диссертациями.

В 1972 г. за большие заслуги в деле подготовки национальных квалифицированных кадров Монгольской народной республики Иркутский политехнический институт был награжден орденом Трудового Красного Знамени Монголии, а в 1980 г. за заслуги в подготовке высококвалифицированных специалистов для народного хозяйства и развитии научных исследований первым из иркутских вузов Иркутский политехнический институт был награжден орденом Трудового Красного Знамени СССР. В этом немалая заслуга принадлежит и коллективу кафедры РМПИ, чья многогранная и результативная деятельность была весомой составляющей успехов, достигнутых институтом в целом.

Развитие кафедры РМПИ продолжалось и в последующие годы. К 60-летию горного факультета и института (на 1 января 1990 г.) кафедрой РМПИ было подготовлено более 4000 горных инженеров, в том числе более 150 граждан Монголии. Почти 100 выпускникам были вручены дипломы с отличием. В эти годы заметно расширились творческие связи кафедры с горнодобывающими предприятиями прилегающих регионов, стало возрастать с их стороны число заявок по выполнению научно-исследовательских работ. Кадровый состав кафедры и ее лабораторная база позволили выполнять исследования на более высоком научном и профессиональном уровне. В период 1970–2010 гг. на кафедре РМПИ и временно выделившейся кафедре ТКМО (позднее кафедра открытых горных работ (ОГР)) работали 8 профессоров и более 20 докторов технических наук, 3 лауреата Государственной премии (рис. 2), а также штатные совместители: генеральный директор АО «Востсибуголь» профессор И. М. Щадов (позднее министр угольной промышленности СССР), заведующий лабораторией ОАО «Иргиредмет» В. Г. Пятаков, директор Иркутского филиала Научно-технического центра «НИИОГР» В. М. Наумов.

В 1979 г. в связи с созданием в стране специальности 0213 «Технология, комплексная механизация разработки россыпных место-

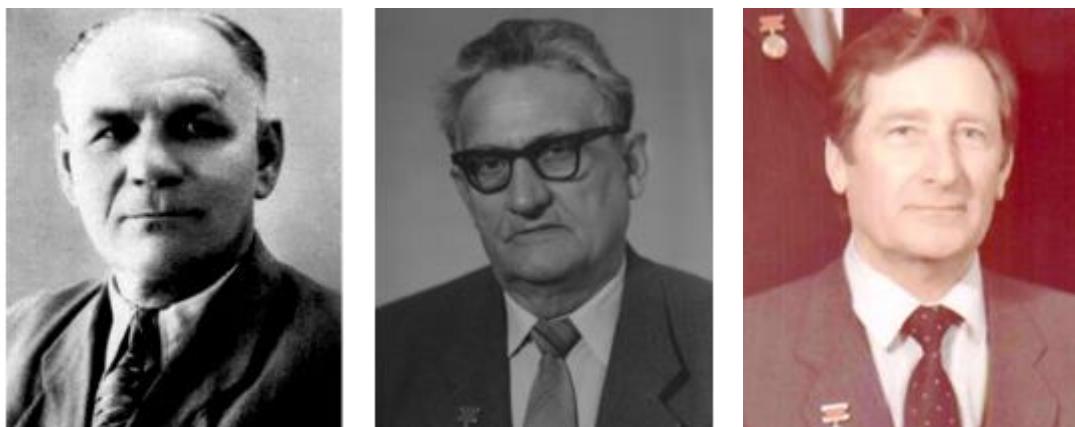


Рис. 2. Преподаватели кафедры – лауреаты Государственной премии (слева направо):
заведующий кафедрой, профессор И. А. Леоненко (годы работы 1966–1975);
заведующий кафедрой, профессор, доктор технических наук В. А. Кудряшев (годы работы 1949–2003);
профессор Е. Т. Жученко (годы работы 1979–2002)

Fig. 2. Professors of the Department – laureates of the State Prize (from left to right):
Head of the Department, Professor I. A. Leonenko (worked from 1966 to 1975);
Head of the Department, Professor, Doctor of technical sciences V. A. Kudryashev (worked from 1949 to 2003);
Professor E. T. Zhuchenko (worked from 1979 to 2002)

рождений» была выделена кафедра разработки россыпных месторождений (РПМ). Заведующим кафедрой был избран лауреат Государственной премии, профессор, доктор технических наук В. А. Кудряшев.

В 1987 г. произошло объединение кафедры ТКМО и кафедры РПМ в кафедру ОГР для подготовки горных инженеров по специальности 130403 «Открытые горные работы» с двумя специализациями: «Разработка рудных, угольных месторождений» и «Разработка россыпных месторождений» с приемом 100 человек.

С 1995 по 2010 гг. на кафедрах РМПИ и ОГР была организована многоуровневая подготовка специалистов (бакалавр, инженер, магистр). Первые магистры в Иркутской области были выпускниками кафедр РМПИ, ОГР и ГМ. До 2010 г. магистратуру закончил 21 выпускник, в том числе 5 человек из Монгольской Народной Республики. За этот же период 26 выпускников-«открытчиков» защитили кандидатские и 7 выпускников – докторские диссертации.

За период выделения кафедр, специализирующихся на подготовке инженеров для открытых горных работ (ТКМО, РПМ, ОГР), было выпущено более 3500 инженеров-технологов для открытой разработки рудных, угольных и россыпных месторождений, в том числе около 100 специалистов для Монголии.

В 2010 г. в связи с уменьшением контингента студентов из-за сокращения бюджетных мест по специальностям «Открытые горные работы» и «Подземная разработка месторождений полезных ископаемых», а также повышением стоимости обучения на коммерческой основе кафедры РМПИ и ОГР были объединены. Название объединенной кафедры осталось изначальным – РМПИ.

В связи с выходом нового федерального государственного образовательного стандарта с 2011 г. начался прием на специальность «Горное дело». Кафедра РМПИ продолжила подготовку горных инженеров по специализациям «Подземная разработка рудных месторождений» и «Открытые горные работы».

В настоящее время на кафедре РМПИ Иркутского национального исследовательского технического университета работают 11 преподавателей. Общее количество студентов дневной формы обучения – 230–250 человек, заочной формы обучения – 260–280 человек. Почти все преподаватели имеют ученую степень и ученое звание. На кафедре осуществляется подготовка аспирантов и докторантов по специальности 25.00.22 «Геотехнология (подземная, открытая и строительная)». Общее количество обучающихся в аспирантуре – 5–6 человек.



В числе первых кафедра РМПИ начала развивать новые формы сотрудничества с ведущими горнодобывающими предприятиями России, такими как АК «АЛРОСА», ПАО «ГМК «Норильский никель», ПАО «Полюс», ООО «Руссдрагмет», ЗАО НПО «Полиметалл», ПАО «Бурятзолото», ООО «Компания «Востсибуголь» и другие. С помощью вышеупомянутых компаний в настоящее время осуществляется ремонт кафедральных аудиторий, приобретается современное лабораторное оборудование. Благодаря помощи горных предприятий кафедра РМПИ располагает современной учебно-лабораторной базой, удовлетворяющей необходимым требованиям для организации учебного процесса и проведения научных исследований.

Сотрудниками кафедры РМПИ выполняется большой объем научно-исследовательских и проектных работ (в среднем 10–15 хоздоговорных работ в год). Тематика научно-исследовательских работ кафедры по освоению месторождений подземным способом (руководитель профессор А. М. Павлов) связана с исследованием природных и технологических особенностей подземной разработки рудных месторождений Сибири, Дальнего Востока, с изучением характера влияния на показатели эффективности напряженно-деформированного состояния массива, ослабленного горными выработками, совершенствованием применяемых и изысканием новых более эффективных систем разработки с обоснованием рациональных параметров технологии. По этой тематике проводятся исследования не только в России, но и за рубежом. Проведены исследования геомеханических процессов на подземных рудниках в странах СНГ: в Узбекистане (рудники «Ангренский», «Каульдинский», «Коч-Булакский», «Марджан-Булакский» и др.), в Таджикистане (горно-обогатительный комбинат «Макмальский», прииск «Дарваз» и рудник «Тарор»), на Украине (рудник «Сауляк»).

На основе выполненных исследований разработано более 20 методических и нормативных документов по управлению геомеханическими процессами на золотодобывающих предприятиях Дарасунского, Ирокиндинского, Холбинского, Ново-Широкинского, Май-

ского и других месторождений, рекомендованных органами Ростехнадзора для практического применения.

Одним из научных направлений кафедры является разработка ресурсосберегающих технологий горных работ (научный руководитель профессор Б. Л. Тальгамер). Данный вид исследований направлен на создание эффективных способов эксплуатации угольных и россыпных месторождений со сложными горнотехническими условиями залегания, изыскание эффективных технологий вскрышных работ, разработку методических положений по определению рациональных технологических схем выемочных и отвальных работ, исследование влияния природных и технологических факторов на работу горного оборудования. Сотрудниками кафедры выполнен большой объем проектных работ по разработке россыпных и угольных, а также нерудных месторождений полезных ископаемых (более 50 проектов за последние 5 лет). Заказчиками проектной документации являются как крупные компании (АК «АЛРОСА», ООО «Компания «Востсибуголь»), АО «ЗДК «Лензолото», ПАО «Высочайший», ПАО «Селигдар»), так и небольшие горные предприятия Сибири и Дальнего Востока. Проекты и технико-экономические обоснования выполняются для освоения различных месторождений полезных ископаемых (угольных, золото- и алмазоносных, железорудных месторождений, месторождений талька, гипса, стройматериалов, полудрагоценных камней).

За последние годы сотрудниками кафедры предложены новые технологии разработки глубоких и труднодрагируемых россыпей, горизонтальных и наклонно залегающих пластовых месторождений, консервации и рекультивации карьеров, повторной дражной разработки техногенных россыпей, новые системы и способы водоснабжения горных работ и очистки сточных вод от взвешенных частиц, способы подготовки песков к дезинтеграции, способы строительства водоподпорных сооружений и перехода через них драг, способы формирования отвалов, а также новое оборудование и устройства для выемочных работ, очистки шпурков, крепления выработок, инициирования шпуровых зарядов. На



новые технические решения сотрудники кафедры ежегодно получают 2–3 патента.

Результаты научных исследований кафедры РМПИ широко используются в учебном процессе и отражаются в многочисленных публикациях, в том числе в центральных изданиях, таких как «Горный журнал», «Известия высших учебных заведений. Горный журнал», «Горный информационно-аналитический бюллетень», «Горная промышленность», «Рациональное использование недр».

К выполнению научно-исследовательских и опытно-конструкторских работ кафедра привлекает студентов и аспирантов. На платной основе в течение года исследования выполняют 3–5 обучающихся.

Аспиранты и студенты, обучение которых курируется кафедрой РМПИ, ежегодно выступают с докладами на научно-технических конференциях Института недропользования Иркутского национального исследовательского технического университета, региональных и Всероссийских конференциях, участвуют в олимпиадах и конкурсах. Ежегодно по результатам выполняемых научно-исследовательских работ учащиеся специальностей «Открытые горные работы» и «Подземная разработка рудных месторождений» награждаются дипломами и грамотами. Выполненные студентами кафедры научно-исследовательские и дипломные работы практически ежегодно получают призовые места на всероссийских конкурсах и олимпиадах.

Кафедра имеет научные связи со многими институтами, такими как «Иркутский государственный научно-исследовательский институт редких и цветных металлов», Институт горного дела Уральского отделения Российской академии наук, Институт горного дела им. Н. А. Чинакала Сибирского отделения Российской академии наук, Институт горного дела Дальневосточного отделения Российской академии наук, Национальный исследовательский техногический университет «МИСиС», Уральский государственный горный университет, Сибирский федеральный университет, Забайкальский государственный университет и другие. Члены кафедры регулярно принимают участие в международных, республиканских и региональных научно-

практических конференциях, проводимых в указанных организациях. Сотрудничая с горными предприятиями, профессорско-преподавательский состав кафедры осуществляет переподготовку инженерно-технических работников, оказывает содействие в решении технических проблем путем выполнения научно-исследовательских работ, готовит проектную документацию по освоению новых месторождений.

На кафедре работают научно-исследовательская и учебно-исследовательская лаборатории, оснащенные современной компьютерной техникой с необходимым программным обеспечением. Имеются полномасштабные плоттеры фирмы Hewlett-Packard, принтеры, сканеры, мультимедийные проекторы, интерактивные доски и т. д. Вычислительная техника обновляется за счет средств спонсорской помощи базовых предприятий.

Техническая база Лаборатории геомеханики и физики горных пород представляет собой современный производственный комплекс. В лаборатории установлено современное оборудование с компьютерным обеспечением: испытательные прессы, комплексная установка для испытаний образцов горных пород со сжатием в стабилометре, ультразвуковых исследований, камнерезное оборудование импортного и отечественного производства, микроскоп Zais, система ультразвуковых измерений продольных и поперечных волн ULT-100, шлифовально-полировальные станки грубой и точной шлифовки, машина для получения керна (рис. 3).

Предприятиями-заказчиками по темам научно-исследовательских и опытно-конструкторских работ кафедры являются ООО «Норильскгеология», ООО «Компания “Востсибуголь”», ООО «Ирбейский разрез», ПАО «Бурятзолото», ООО «Фоника гипс», ООО «Хужир Энтерпрайз», АО «Читагеологоразведка», АО «Иргиредмет», АО «Русбурмаш» и другие.

Выпускники кафедры всегда востребованы промышленностью. За многолетний период деятельности кафедра РМПИ (с учетом деятельности кафедр ТКМО, РРМ, ОГР) вручила путевки в жизнь более чем 7000 ее выпускников, подготовив их к инженерной деятельности по освоению богатств нашей страны.



Рис. 3. Оборудование Лаборатории геомеханики и физики горных пород:

a – пресс ИП-1000м с системой управления ASTM-DIGITAL; b – электрогидравлическая система RDS-500

Fig. 3. Equipment of the Rock Geomechanics and Physics Laboratory:

a – IP-1000m press with ASTM-DIGITAL control system; b – RDS-500 electro-hydraulic system

Десятки выпускников кафедры РМПИ (ТКМО, ОГР) были и являются президентами, вице-президентами, управляющими, генеральными директорами и главными инженерами объединений, комбинатов, компаний, управлений и горно-обогатительных комбинатов; директорами, заместителями и главными инженерами отраслевых и проектных институтов. Сотни выпускников стали директорами и главными инженерами рудников, разрезов, карьеров, приисков, закрытых и открытых акционерных обществ, обществ с ограниченной ответственностью, председателями старательских артелей.

Заметной является роль кафедры в подготовке профессорско-преподавательских и научных кадров: десятки выпускников стали докторами технических наук, более сотни – кандидатами технических наук.

Результаты выполненных коллективом научных и научно-прикладных исследований, несомненно, внесли определенный вклад в

развитие технического прогресса на горнодобывающих предприятиях Восточной Сибири и прилегающих регионов.

Коллектив кафедры РМПИ продолжает плодотворно работать над дальнейшим совершенствованием учебного процесса и его методическим обеспечением, развитием учебно-исследовательской базы, внедрением новых форм воспитательной работы со студентами, расширением подготовки научно-педагогических кадров через аспирантуру и соискательство, установлением более тесных творческих связей с производством и повышением научно-прикладной значимости выполняемых научно-исследовательских работ.

В настоящее время кафедра РМПИ успешно развивается по всем основным направлениям деятельности Иркутского национального исследовательского технического университета. Ее сотрудники прилагают значительные усилия для повышения качества подготовки горных инженеров. Систематически пересма-



тряются образовательные программы и формируемые у обучающихся компетенции, периодически перерабатывается содержание специальных дисциплин с учетом изменения

минерально-сырьевой базы и конкурентной среды недропользователей, а также уровня развития информационных и цифровых технологий образовательного процесса.

**Основные труды преподавателей
кафедры разработки месторождений полезных ископаемых**

1. Свиридов А. П. Драгостроение и драгирование золота и платины. М. – Иркутск: Востсибкрайиздат, 1935. 206 с.
2. Свиридов А. П. Драги и драгирование: учеб. пособие. М.: Металлургиздат, 1952. 476 с.
3. Тяжелов В. И. Разработка месторождений открытым способом в зимний период. Иркутск: Иркут. кн. изд-во, 1958. 127 с.
4. Соломин К. В. Обогащение песков россыпных месторождений полезных ископаемых. М.: Госгортехиздат, 1961. 399 с.
5. Казанков Ю. П. Эксплуатация драг в холодные периоды года: учеб. пособие. Иркутск: Изд-во ИПИ, 1979. 87 с.
6. Ляхов А. И. Технология разработки жильных месторождений. М.: Недра, 1984. 240 с.
7. Кудряшев В. А., Потемкин С. В. Основы проектирования разработки россыпных месторождений. М.: Недра, 1988. 198 с.
8. Рангин Н. А. Некоторые вопросы проектирования и эксплуатации угольных шахт. Иркутск: Изд-во Иркут. ун-та, 1993. 184 с.
9. Островский Г. К., Федорко В. П. Проектирование технологических схем бестранспортной системы разработки: учеб. пособие. Иркутск: Изд-во Иркут. ун-та, 1993. 217 с.
10. Тальгамер Б. Л. Охрана природных ресурсов при дражной разработке россыпей: учеб. пособие. Иркутск: Изд-во ИрГТУ, 2000. 102 с.
11. Дудинский Ф. В. Технологические параметры разработки глубоких россыпей открытым способом: монография. Иркутск: Изд-во ИрГТУ, 2002. 148 с.
12. Мореходов В. М. Обогащение песков россыпей: учеб. пособие. Иркутск: Изд-во ИрГТУ, 2004. 150 с.
13. Драбчук Ю. В. Подземная разработка россыпных месторождений: учеб. пособие. Иркутск: Изд-во ИрГТУ, 2006. 160 с.
14. Драбчук Ю. В. Вскрытие и подготовка рудных месторождений: учеб. пособие. Иркутск: Изд-во ИрГТУ, 2007. 156 с.
15. Драбчук Ю. В. Технология и безопасность взрывных работ. Специальные главы: учеб. пособие. Иркутск: Изд-во ИрГТУ, 2008. 144 с.
16. Махно Д. Е., Федорко В. П. Методы и способы разрушения горных пород: монография. Иркутск: Изд-во ИрГТУ, 2008. 136 с.
17. Тальгамер Б. Л., Коробкова Е. А. Угольная промышленность Иркутской области: история и перспективы развития. Иркутск: Изд-во ИрГТУ, 2009. 112 с.
18. Тальгамер Б. Л., Шиверновский А. В., Коробкова Е. А. Восстановление земель, нарушенных открытыми горными работами, в условиях Восточной Сибири: учеб. пособие. Иркутск: Изд-во НИ ИрГТУ, 2012. 132 с.
19. Павлов А. М. Совершенствование технологии подземной разработки жильных месторождений золота: монография. Иркутск: Изд-во НИ ИрГТУ, 2013. 127 с.
20. Чемезов В. В., Тальгамер Б. Л. Техногенные россыпи (образование, оценка и эксплуатация): монография. Иркутск: Изд-во НИ ИрГТУ, 2013. 239 с.
21. Дроздов А. В., Скурихин Ю. Г. Нефтегазобезопасность при подземной разработке месторождений алмазов на рудниках Якутии: монография. Иркутск: Изд-во НИ ИрГТУ, 2017. 489 с.
22. Костромитинов К. Н., Тальгамер Б. Л., Лысков В. М. Разработка месторождений благородных металлов: учеб. пособие. Ч. 1. Иркутск: Изд-во НИ ИрГТУ, 2017. 286 с.
23. Костромитинов К. Н., Тальгамер Б. Л., Лысков В. М. Разработка месторождений благородных металлов: учеб. пособие. Ч. 2. Иркутск: Изд-во НИ ИрГТУ, 2018. 258 с.
24. Костромитинов К. Н., Тальгамер Б. Л. Подземная разработка месторождений. Вскрытие и подготовка запасов: учеб. пособие. Ч. 1. Иркутск: Изд-во ИРНИТУ, 2021. 198 с.

Информация об авторе / Information about the author



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



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

Вклад автора / Contribution of the author

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

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

Конфликт интересов / Conflict of interests

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

Автор прочитал и одобрил окончательный вариант рукописи.
The final manuscript has been read and approved by the author.

Информация о статье / Information about the article

Статья поступила в редакцию 03.09.2021; одобрена после рецензирования 06.10.2021; принятa к публикации 10.11.2021.

The article was submitted 03.09.2021; approved after reviewing 06.10.2021; accepted for publication 10.11.2021.



Научная статья

УДК 550.831

<https://doi.org/10.21285/2686-9993-2021-44-4-369-381>



Структура Эрдэнэтского рудного района по гравиметрическим данным

Евгений Хрисанфович Турутанов^a, Виктор Степанович Канайкин^b

^aИнститут земной коры СО РАН, г. Иркутск, Россия

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

Автор, ответственный за переписку: Канайкин Виктор Степанович, kanvs@yandex.ru

Резюме. Целью данного исследования явилось построение модели структуры верхней части земной коры рудного района Монголии и трехмерное картирование интрузивных тел, с которыми связывается медно-порфировое оруденение. Авторами выполнена площадная гравиметрическая съемка с плотностью наблюдений 1 пункт на 6 км² с точностью измерений $\pm 0,8$ мГл, в результате которой установлено, что медно-молибденовые рудопроявления района, включая Эрдэнэтское, приурочены к локальным гравитационным минимумам, которые интерпретируются как утолщение тела селенгинских гранитоидов и, в свою очередь, приурочены к локальным углублениям подошвы этого тела. Установлена пространственная близость подводящих каналов рудоносных малых интрузий и крупных гранитоидных тел селенгинского комплекса. Рудоносные порфировые интрузии приурочены к довольно широким (около 10 км) зонам, расположенным над углублениями подошвы всех интрузий селенгинского комплекса (как гранитоидного, так и диоритового состава). Поскольку локальные углубления подошвы гранитоидных интрузивов соответствуют положению подводящих магму каналов, рудоносные малые интрузии внедрялись примерно в тех же местах, где существовали подводящие каналы гранитоидных интрузий селенгинского комплекса. Поэтому можно полагать, что в данном случае имеет место не только тектоническая унаследованность (приуроченность к одним и тем же разломам и местам их пересечения), но и генетическая, поскольку источниками малых интрузий могли являться остаточные расплавы тех же очагов, в которых генерировалась магма интрузий селенгинского комплекса. С этой точки зрения целесообразность выделения самостоятельного эрдэнэтского комплекса представляется спорной. Геофизические данные о пространственной близости подводящих каналов указанных интрузий позволяют лишь поставить вопрос о такой целесообразности. Решение этого вопроса возможно на основе комплексного анализа петрологических и геохимических данных.

Ключевые слова: аномалия силы тяжести, гранитные интрузии, месторождения полезных ископаемых

Для цитирования: Турутанов Е. Х., Канайкин В. С. Структура Эрдэнэтского рудного района по гравиметрическим данным // Науки о Земле и недропользование. 2021. Т. 44. № 4. С. 369–381. <https://doi.org/10.21285/2686-9993-2021-44-4-369-381>.

Original article

Structure of the Erdenet ore district according to gravimetric data

Evgeny K. Turutanov^a, Viktor S. Kanaykin^b

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

^bIrkutsk National Research Technical University, Irkutsk, Russia

Corresponding author: Viktor S. Kanaykin, kanvs@yandex.ru

Abstract. The purpose of the study is construction of a model of the upper crust structure of the ore region in Mongolia and the three-dimensional mapping of intrusive bodies with which copper-porphyry mineralization is associated. An areal gravity survey was carried out with an observation density of 1 point per 6 km² with the measurement accuracy of ± 0.8 mGal. As a result, it was found that copper-molybdenum ore occurrences of the area including the Erdenet ore district are confined to local gravitational minima, which are interpreted as thickening of the body of the Selenga granitoids. The latter are confined to local depressions of this body base. The spatial proximity of supply channels of small ore-bearing intrusions and large granitoid bodies of the Selenga complex has been established. Porphyry ore intrusions are confined to rather wide (about 10 km) zones located above the depressions of the base of all intrusions of the Selenga complex (both granitoid and diorite). Since the local base depressions of the granitoid intrusions correspond to the position of magma supply channels, ore-bearing small intrusions were introduced approximately in the same places where the supply chan-



nels of granitoid intrusions of the Selenga complex existed. Therefore, it can be assumed that this case is characterized by not only tectonic inheritance (confined to the same faults and their intersection points), but also by a genetic one, since residual melts of the same foci, in which intrusion magma of the Selenga complex was generated might be the sources of small intrusions. From this point of view, the expediency of distinguishing an independent Erdenet complex seems to be controversial. Geophysical data on the spatial proximity of specified intrusion supply channels permit only to raise the question of such expediency. The solution to this issue is possible on the basis of a comprehensive analysis of petrological and geochemical data.

Keywords: gravity anomaly, granite intrusions, mineral deposits

For citation: Turutanov E. K., Kanaykin V. S. Structure of the Erdenet ore district according to gravimetric data. *Nauki o Zemle i nedropol'zovanie = Earth sciences and subsoil use*. 2021;44(4):369-381. (In Russ.). <https://doi.org/10.21285/2686-9993-2021-44-4-369-381>.

Введение

Интерпретация геофизических данных, проведенная в дополнение к геологическому картированию, позволяет получить представление об объемном строении верхней части земной коры, в частности о глубинной геометрии гранитных plutонов. Изучение морфологии гранитных интрузий имеет большое научное и практическое значение. Сведения о форме и размерах интрузивных тел дополняют информацию, используемую при разработке представлений о геодинамических условиях их образования и механизме проникновения в верхние части земной коры. С гранитами генетически и пространственно связаны многие месторождения редких и цветных металлов. Месторождения эти локализуются либо в экзоконтактовых зонах над кровлей мезозойских гранитных массивов, либо в эндоконтактовых зонах апикальных частей интрузивов. Такое распределение минерализации, естественно, вызывает интерес к морфологии кровли гранитных plutонов, так как при этом могут быть получены важные сведения для ориентировки поисковых работ в районах, где рудоносные граниты слабо вскрыты на уровне современного денудационного среза.

Возможности чисто геологических методов в решении этой задачи ограничены. Детальные структурные съемки позволяют реконструировать первичную форму обнаженных частей plutонов. Экстраполяция полученных данных на невскрытые части интрузий дает результаты лишь применительно к узким зонам, непосредственно примыкающим к выходам гранитов. Бурение же глубоких скважин в районах, перспективы которых еще недостаточно ясны, может оказаться экономически неоправданным.

При изучении морфологии гранитных интрузий наиболее приемлемо применение геофизических методов, которые позволяют в ряде случаев определить форму и размеры plutонов со степенью приближения, достаточной для общих теоретических разработок и для ориентировки поисковых работ. Во многих регионах уже накоплен значительный опыт по решению такого рода задач [1–3].

В ходе представленного исследования с целью построения модели структуры верхней части земной коры одного из наиболее интересных рудных районов Монголии и трехмерного картирования интрузивных тел, входящих в позднепалеозойско-раннемезозойскую вулкано-плутоническую ассоциацию пород, с которой связывается медно-порфировое оруденение, в окрестностях Эрдэнэтского медно-молибденового месторождения на площади около 5000 км² авторами была выполнена гравиметрическая съемка с плотностью наблюдений 1 пункт на 6 км² с точностью измерений ±0,8 мГал.

Материалы и методы исследования

Геологическое строение района. Эрдэнэтский рудный район расположен на площади позднепалеозойско-раннемезозойского Орхон-Селенгинского прогиба, выделенного на территории Северной Монголии [4–6]. Он выполнен главным образом вулканогенными и вулканогенно-осадочными толщами Хануйской серии перми, которые прорываются интрузивными образованиями селенгинского и эрдэнэтского комплексов перми – раннего триаса и перекрывающими их вулканитами могодской свиты позднего триаса – ранней юры. Фундамент прогиба сложен допермскими гранитами и, возможно, позднепротерозойско-



раннепалеозойскими метаморфизованными толщами.

Наиболее древние осадочные породы встречены в ксенолитах нижнепалеозойских гранитов на левом берегу Орхона. Представлены они кристаллическими, доломитизированными известняками и прослоями известковистых и серицита-хлоритовых сланцев. Эти породы условно относятся к кембрию – позднему докембрию.

Судя по геологическому строению более обширной территории, фундамент прогиба может частично слагаться и верхнери-фейскими метаморфическими породами, представленными главным образом мигматизированными биотитовыми и биотитамфиболовыми гнейсами.

На интрузивных породах, слагающих фундамент Орхон-Селенгинского прогиба, залегает урмугтэйульская свита, относимая к каменноугольной системе. Ее небольшие выходы картируются на левобережье р. Орхон. Она представлена песчаниками, алевролитами, гравелитами, конгломератами небольшой мощности.

Хануйская серия пермского возраста образует основной объем наполнения Орхон-Селенгинского прогиба [4]. В ее составе выделяются три толщи (снизу вверх): осадочно-вулканогенная андезитовая, осадочно-вулканогенная андезито-липаритовая, вулканогенная андезито-базальтовая. Для основной части пермских эфузивов характерна субщелочная тенденция.

Нижняя толща сложена андезитовыми порфиритами, туфами андезитового состава с прослоями туфоконгломератов и туфопесчаников. Редко встречаются прослои базальтов, риолитов и туфов основного и кислого состава. Туфогенно-осадочные породы слагают не менее 30 % объема толщи. Местами их доля увеличивается до 55 %. Мощность толщи варьирует от 500 до 1500 м.

Средняя толща залегает согласно на нижней. Представлена она в своей нижней части преимущественно эфузивами кислого состава и их туфами. В середине ее разреза появляются прослои андезитов, их туфов и андезито-базальтов. В верхней части разреза количество средних и основных эфузивов

значительно возрастает. По оценке Д. Оролмаат [4], во всей средней толще туфогенные породы составляют около 40 %, вулканиты основного и среднего состава – около 25 %, кислого состава – около 35 %. Общая мощность толщи оценивается в 1500–2000 м.

Верхняя толща сложена андезито-базальтами, базальтами с линзовидными прослоями туфов, туфоалевролитов и туфопесчаников. Туфогенные породы слагают не более 10 % объема свиты. Мощность свиты составляет 1700 м. Необходимо отметить, что все пермские эфузивные и эфузивно-осадочные породы подвергнуты зеленокаменному изменению. Этим они отличаются от залегающих на них с несогласием триасовых и триасово-юрских образований.

Выше по разрезу залегают образования абзогской и могодской свит, относимых к триасу [4]. Первая свита представлена песчаниками, алевролитами, конгломератами. В ее основании залегают конгломераты, содержащие гальку верхнепермских гранитов. Полная мощность абзогской свиты достигает 2200 м. В районе работ она развита в значительно меньших мощностях на его крайнем юго-востоке. Могодская свита относится к орхонской серии. Развита эта серия преимущественно в восточной части Северо-Монгольского вулканического пояса. Сравнительно небольшое по площади поле могодской свиты картируется в центральной части района работ. Свита представлена в основном трахиандезитами, трахиандезито-базальтами, трахиандезитовыми порфиритами. Встречаются прослои туфов среднего и основного состава, риолитовых и трахириолитовых порфиритов, конгломератов, песчаников. Как и пермские эфузивы, триасово-юрские вулканогенно-осадочные породы относятся к субщелочным. Мощность свиты изменяется от 650 до 1700 м.

Четвертичные элювиальные, делювиальные, пролювиальные и аллювиальные отложения широко развиты на рассматриваемой площади. Состав их не рассматривается, так как в силу малой мощности (от 0 до 20 м) гравитационным влиянием этих формаций можно пренебречь.

Интрузивные породы района подразделяются на три комплекса: среднекембрийско-



ордовикский, верхнепермский (селенгинский) и нижнетриасовый (эрдэнэтский). Кроме пород этих комплексов, слагающих крупные тела, некоторыми исследователями в районе выделяются среднетриасово-нижнеюрские и юрские малые интрузии и субвулканические тела.

Среднекембрийско-ордовикский комплекс интрузивных пород, как уже отмечалось выше, образует основание Орхон-Селенгинского прогиба. Эти породы развиты в южной части территории в бассейне р. Орхон. Выделяются две фазы этого комплекса. Первая фаза представлена породами среднего и основного состава. Среди них преобладают диориты, местами встречаются габбро-диориты. Породы первой фазы слагают изолированные массивы-ксенолиты среди гранитоидов второй фазы. Размеры массивов достигают иногда нескольких километров. Основной объем второй фазы представлен гранодиоритами. Иногда наблюдаются отклонения в среднем химическом составе до кварцевых диоритов и плагиогранитов.

Селенгинский комплекс пермо-триасовых интрузий особенно широко развит в районе работ. Данные интрузии прорывают породы всей Хануйской серии [7, 8]. На этом основании некоторые исследователи относят селенгинский комплекс к нижнему триасу. В составе комплекса выделяются три фазы. Образования первой фазы комплекса представлены диоритами, габбро-диоритами и габбро. Преобладает первая разновидность пород. Крайние фациальные разновидности связаны постепенными переходами. Среди пород второй фазы преобладают умеренно кислые граниты. Реже встречаются гранодиориты, кварцевые диориты, лейкократовые граниты и граносиениты. Почти во всех разновидностях пород плагиоклаз обычно преобладает над калиевым полевым шпатом.

Эрдэнэтский комплекс нижнего триаса представлен порфировыми интрузиями. Раньше эти образования относились к третьей фазе селенгинского комплекса. Впоследствии порфировые рудоносные интрузии были выделены в самостоятельный эрдэнэтский комплекс [9]. К нему относят штоки гранодиорит-порфиров, плагиогранит-порфиров

и сиенит-порфиров. С этими породами непосредственно связаны месторождения и рудоуказания меди и молибдена.

Район работ в тектоническом отношении является частью Орхон-Селенгинского прогиба, который заполнялся в позднем палеозое главным образом эфузивно-осадочными толщами хануйской серии [3]. Эта своеобразная активизация более древней каледонской складчатой системы, по-видимому, происходила в условиях растяжения, возникшего в тыловой части активной окраины андийского типа. Судя по характеру залегания пермских эфузивно-осадочных толщ, фазы растяжения чередовались с фазами сжатия, что привело к смятию этих толщ в довольно напряженные складки. Углы падения на крыльях складок достигают 50–60°. Простирание пород варьирует от северо-восточного до субмеридионального и даже северо-западного. В северной части района простирация эфузивно-осадочных толщ близки к субширотным. Такие причудливые изменения простирации складок при относительной крутизне их крыльев указывают на большую роль блоковых движений фундамента в условиях орогенеза над зоной субдукции. Дислокации эфузивно-осадочного чехла «приспособились» к таким блоковым движениям. Тектонические движения сопровождались становлением интрузий селенгинского комплекса (либо предшествовали ему). Затем проявились малые интрузии эрдэнэтского комплекса.

Вулканогенные и осадочные толщи позднего триаса – юры (могодская и абзогская свиты) накапливались, очевидно, в наложенных (по отношению к Орхон-Селенгинскому прогибу) мульдах [3]. Залегание этих толщ свидетельствует о падении интенсивности тектонических движений: углы падения на крыльях моноклиналей и брахисинклиналей составляют 3–30°.

Как образование пермских и триасовых структур, так и проникновение в верхние этажи коры крупных порций магмы были связаны с разломами. Однако часть разломов отмирала, другие разломы подновлялись, а некоторые образовывались заново. В связи с этим не всегда возможно прямо соотнести то или иное геологическое явление (образование



лавового потока, внедрение интрузии) с той сетью разломов, которая картируется в настоящее время. Тем не менее во многих случаях связь с разломами представляется очевидной. Примером является линейное расположение порфировых интрузий вдоль линии, имеющей северо-западное простиранье.

Наконец, во второй половине кайнозоя территория центральной Азии в целом подверглась новейшей активизации, в результате которой образовались сводовые поднятия, представляющие основу современных горных систем. В неотектоническом плане район работ расположен на северо-восточном склоне обширного Хангайского поднятия.

Из полезных ископаемых наибольший интерес в исследуемой области представляют месторождения и рудопроявления меди и молибдена, связанные с порфировыми интрузиями. Эрдэнэтское месторождение приурочено к одноименной зоне измененных пород, в которой гидротермально-метасоматическому изменению подвержены как рудоносные гранодиорит-порфиры, так и вмещающие их гранодиориты. Характер изменений – от хлоритизации и пелитизации на периферии зоны до образования кварц-серицитовых метасоматитов в ее центральной части, где расположены рудные штокверки. Медно-молибденовое оруднение в штокверках имеет прожилково-вкрапленный характер и представлено халькопиритом, молибденитом и другими медными минералами, а также сульфидами свинца, цинка и молибдена. Медно-молибденовые рудопроявления имеются и в окрестностях Эрдэнэтского месторождения.

Физические свойства горных пород и природа аномалий Буге. Отбор образцов горных пород для изучения физических свойств осуществлялся на участках, выбранных на основе анализа результатов средне- и крупномасштабных геологических съемок, что позволило получить наиболее представительные выборки для подавляющей части разновидностей горных пород района. Детально изучены физические свойства эфузивно-осадочных образований, заполняющих Орхон-Селенгинский прогиб, и их прорывающих интрузий.

К сожалению, породы фундамента указанного прогиба остались практически неизученными в связи с труднодоступностью мест их выходов и ограниченностью времени работ. Для характеристики этих пород мы вынуждены пользоваться справочными данными¹ [10].

Результаты измерений обрабатывались с использованием статистических методов. Распределение плотности в той или иной разновидности пород подчиняется нормальному закону, а распределение магнитной восприимчивости – логнормальному закону. В итоге были получены средние значения плотности комплексов пород, слагающих крупные объемы, которые могут создавать заметные аномалии силы тяжести.

Фундамент Орхон-Селенгинского прогиба, как отмечалось выше, сложен преимущественно интрузивными породами нижнепалеозойского возраста, среди которых основную роль играют гранодиориты со средней плотностью 2,67 г/см³. Над выходами гранодиоритов локальные гравитационные аномалии практически отсутствуют. На небольших участках развиты нижнепалеозойские граниты с плотностью 2,62 г/см³, которым соответствуют слабые по интенсивности отрицательные аномалии силы тяжести.

Средневзвешенные плотности верхней и нижней толщ хануйской серии практически одинаковы и могут быть оценены в 2,74 г/см³. Однако в средней толще, на участках, где возрастает роль кислых эфузивов, плотность может уменьшаться до 2,68 г/см³. Практически над всеми выходами пород хануйской серии отмечаются положительные аномалии силы тяжести.

Средние плотности отложений абзогской и могодской свит оцениваются в 2,7 и в 2,74 г/см³ соответственно. Из-за небольшой мощности (в сравнении с эфузивами хануйской серии) триасовые отложения практически не создают локальные аномалии силы тяжести.

Интрузии первой фазы селенгинского комплекса представлены преимущественно диоритами, средняя плотность которых составляет 2,82 г/см³. Над их выходами наблюдаются локальные максимумы силы тяжести.

¹ Физические свойства горных пород и полезных ископаемых (петрофизика). Справочник геофизика / ред. Н. Б. Дортман. М.: Недра, 1984. 455 с.



Основной объем второй фазы этого комплекса представлен умеренно кислыми гранитоидами со средней плотностью 2,62 г/см³. Подчиненную роль в ее составе играют кислые граниты и гранодиориты, плотность которых близка к 2,57 г/см³, а также гранодиориты с плотностью 2,67 г/см³. К выходам пород второй фазы селенгинского комплекса обычно приурочены наиболее интенсивные части отрицательных аномалий силы тяжести. Однако такие аномалии обычно распространены далеко за пределы выходов гранитоидов, что свидетельствует о более широком развитии указанных пород на глубине.

Экспонированные части малых интрузий, с которыми связано медно-молибденовое оруденение, метасоматически изменены. Плотность измененных гранодиорит-порфиров составляет 2,6 г/см³, а гранит-порфиров – 2,52 г/см³. В связи с небольшими объемами эти образования не создают самостоятельных аномалий на фоне гравитационных минимумов, связанных с гранитоидами селенгинского комплекса.

Таким образом, можно предположить, что максимумы гравитационного поля в районе исследований связаны преимущественно с зонами увеличения мощности эфузивов хануйской серии. Часть максимумов создается телами диоритов селенгинского комплекса. Гравитационные минимумы связаны преимущественно с телами гранитоидов того же комплекса, прорывающими толщи хануйской серии. Часть минимумов может наблюдаться над выходами допермского (нижнепалеозойского) фундамента, сложенного гранодиоритами, а иногда гранитами.

Методика количественной интерпретации аномалий силы тяжести. Аномалии Буге обусловлены как плотностными неоднородностями верхней части земной коры, которые в нашем случае являются непосредственным объектом изучения, так и глубинным строением литосферы. При относительно небольшой площади территории съемки влияние глубинного строения проявляется как региональный фон, обуславливающий увеличение значений отрицательной аномалии. Для геологической интерпретации гравитационного поля этот региональный фон целесообразно

элиминировать. Одним из способов снятия регионального фона является вычисление изостатических аномалий, так как ранее было показано, что литосфера Монголии близка к состоянию изостатического равновесия [11, 12]. Для вычисления изостатических аномалий из значений гравитационного поля в редукции Буге необходимо исключить влияние компенсации топографических масс, которые представляют собой, по сути дела, теоретическую аномалию Буге, рассчитанную в предположении о полном изостатическом равновесии топографических масс (предполагается, что изостазия осуществляется по схеме Эри). При такой операции интенсивное отрицательное региональное поле элиминируется, но локальные аномалии остаются практически теми же самыми. Для расчетов были использованы остаточные изостатические аномалии, которые получены путем вычитания зональных аномалий из их исходных значений. Зональные аномалии определяются либо по спутниковым данным, либо путем глубокого (по площади 450×450 км) осреднения поля самих изостатических аномалий [13].

Преимуществом остаточных изостатических аномалий является то обстоятельство, что в условиях соблюдения изостазии они отражают абсолютное влияние плотностных неоднородностей верхней части коры и соответствующих им компенсационных масс. При ширине геологических объектов более 20–25 км влияние компенсационных масс можно сильно уменьшить, осуществив переход к так называемым декомпенсационным аномалиям [14]. Эти аномалии практически не содержат региональный фон, обусловленный особенностями глубинного строения, а отражают плотностные неоднородности верхней части земной коры, причем вызываются они любыми отклонениями плотности геологических образований от ее среднего стандартного значения (2,67 г/см³). Последнее обстоятельство существенно облегчает количественную интерпретацию гравитационного поля.

В рассмотренной геолого-геофизической ситуации целесообразной представляется постановка следующих задач количественной интерпретации аномалий силы тяжести:

– картирование суммарной мощности вул-



канитов хануйской серии (точнее, картирование глубины залегания нижнепалеозойского фундамента, так как часть вулканитов замещена более поздними интрузиями);

– определение морфологии интрузивных тел селенгинского комплекса.

Результаты решения поставленных задач могут лишь весьма приближенно описывать реальную геологическую ситуацию, несмотря на сравнительно высокую точность съемки и методов количественной интерпретации. Причинами этого являются довольно жесткая схематизация сложного геологического строения района при интерпретации, использование средних значений плотности при возможной вариации состава в пределах одного интрузивного массива и, наконец, неоднозначность обратной задачи гравиметрии [15, 16].

Особенно сильные последствия неоднозначности решения обратной задачи могут проявиться в случае, когда рассматриваются интрузивные тела, внедрившиеся в толщу эфузивов, которая ограничена снизу поверхностью гранодиоритового фундамента. В общем случае такая постановка вопроса предполагает определение положения трех плотностных границ: поверхности фундамента, кровли и подошвы интрузивных тел. В принципе подобная обратная задача гравиметрии не имеет однозначного решения [17–21].

Для преодоления этой неоднозначности сделано предположение о том, что глубина залегания фундамента (мощность вулканитов) по площади меняется более плавно, чем вертикальная толщина интрузивных тел. Как указывалось выше, зоны развития эфузивных толщ отмечаются гравитационными максимумами, на фоне которых наблюдаются локальные отрицательные аномалии, связанные с гранитоидами селенгинского комплекса. Для выделения положительных аномалий, обусловленных эфузивными толщами, вершины этих максимумов были соединены плавными линиями. Значения отрицательных аномалий, связанных с гранитоидами, отсчитывались затем от таких плавных линий. Разделение аномалий в принципе могло осложниться в местах, где развиты диориты первой фазы селенгинского комплекса. Однако на площади исследований имеется только два относи-

тельно крупных массива диоритов, над которыми наблюдаются значительные по величине положительные аномалии силы тяжести. Приурочены эти массивы к краевым частям Орхон-Селенгинского прогиба, где мощность хануйской серии мала и ее гравитационным влиянием можно пренебречь.

На юге района в зоне развития нижнепалеозойских гранодиоритов картируется массив одновозрастных гранитов, над которым наблюдается отрицательная аномалия силы тяжести. Ее количественная интерпретация (то есть определение морфологии древнего гранитного массива) в данных конкретных условиях не создает трудностей, но выявленная плотностная неоднородность фундамента внушает опасение, что подобные ситуации могут иметь место и на участках, где фундамент перекрыт эфузивами хануйской серии.

При построении модели верхней части земной коры Эрдэнэтского района средняя плотность нижнепалеозойского фундамента принята равной $2,68 \text{ г}/\text{см}^3$ в предположении, что основной его объем сложен гранодиоритами и гнейсами. Плотность нижнепалеозойских гранитов в южном выступе фундамента составляет $2,62 \text{ г}/\text{см}^3$. Средняя плотность пород хануйской серии принята равной $2,74 \text{ г}/\text{см}^3$. Выше отмечалось, что плотность средней толщи этой серии в отдельных местах может существенно понижаться, что приведет к преуменьшению оценки суммарной мощности вулканитов. Плотность гранитоидов второй фазы селенгинского комплекса оценена в $2,62 \text{ г}/\text{см}^3$, а диоритов первой фазы – в $2,82 \text{ г}/\text{см}^3$.

Представление о форме и размерах плотностных неоднородностей можно получить методом подбора моделей, гравитационное влияние которых согласуется с выделенными аномалиями силы тяжести. При этом должны быть учтены данные о плотности исследуемых объектов, геологические сведения о положении выходов интрузий на земную поверхность.

По каждому сечению были предприняты попытки подбора наиболее компактного распределения масс с минимальным количеством апофиз в случаях с интрузивными телами. По результатам подбора построены



интерпретационные разрезы по девяти профилям. Примеры полученных разрезов приведены на рис. 1.

По разрезам определялись значения глубины нижнепалеозойского фундамента и вертикальной толщины интрузивных тел (фактически подбирались положения кровли и подошвы интрузивов, но для картирования использовалась именно толщина тел, так как этот параметр оценивается более однозначно). Полученные значения затем интерполировались между профилями в соответствии с ходом изоаномал силы тяжести. Таким способом построены схемы изолиний определяемых параметров.

Полученная схема строения верхней части земной коры Эрдэнэтского района, отражающая глубины допермского фундамента и мощ-

ности интрузивных тел (рис. 2), может претендовать лишь на весьма приближенное отражение реальной геологической структуры.

Результаты исследования и их обсуждение

На большей части исследованной площади глубина допермского фундамента (мощность образований хануйской серии) составляет 4–5 км. Намечается общее возрастание мощности этой серии к юго-западу, где фундамент на локальных участках погружается на глубину до 8–12 км. Локальные впадины отмечаются также севернее и юго-западнее пос. Бугат. В этих впадинах поверхность фундамента расположена на глубине около 6 км. Небольшая впадина расположена между двумя выступами фундамента на юго-востоке

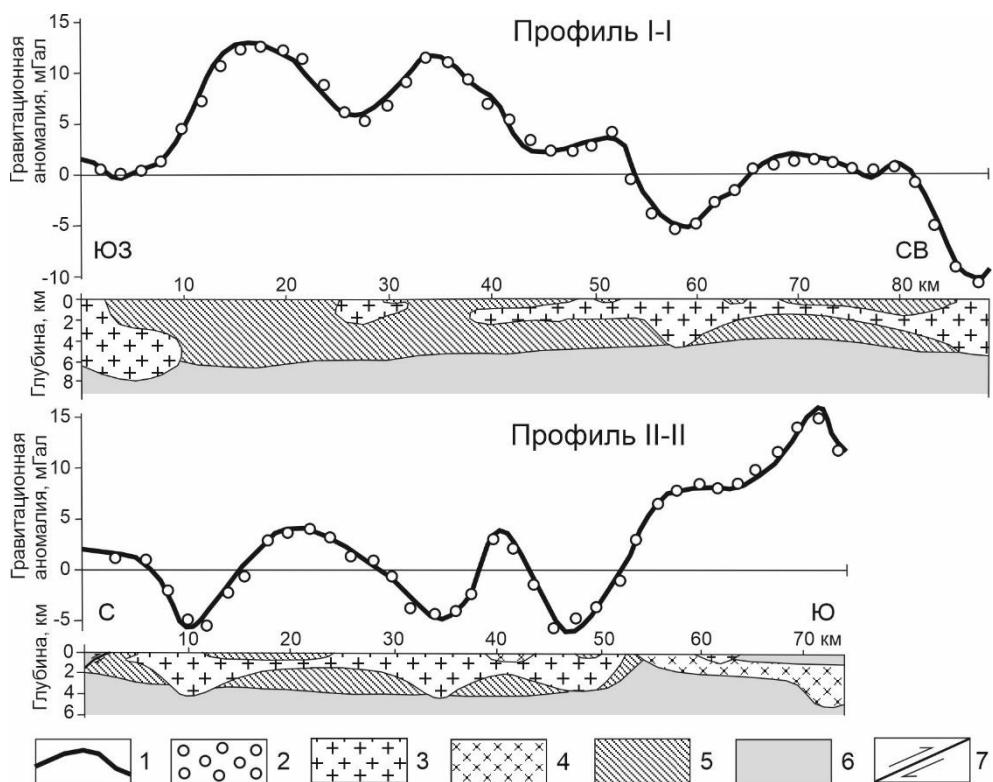


Рис. 1. Интерпретационные разрезы верхней части земной коры Эрдэнэтского района:
1 – наблюдаемые гравитационные аномалии; 2 – гравитационное влияние подобранных моделей;
3 – пермо-триасовые гранитоиды (первая фаза селенгинского интрузивного комплекса); 4 – пермо-триасовые диориты (вторая фаза селенгинского интрузивного комплекса); 5 – пермские эфузивы хануйской серии;
6 – допермские гранодиориты фундамента Орхон-Селенгинского прогиба; 7 – предполагаемый надвиг
Положение разрезов см. на рис. 2

Fig. 1. Interpretative cross-sections of the upper crust in the Erdenet ore district:
1 – observed gravity anomalies; 2 – gravity impact of the selected models; 3 – Permian-Triassic granitoids (the first phase of the Selenga intrusive complex); 4 – Permian-Triassic diorites (the second phase of the Selenga intrusive complex); 5 – Permian effusive rocks of the Khanui series; 6 – Pre-Permian granodiorites of the Orkhon-Selenga depression basement; 7 – estimated thrust
See Fig. 2 for cross-section location

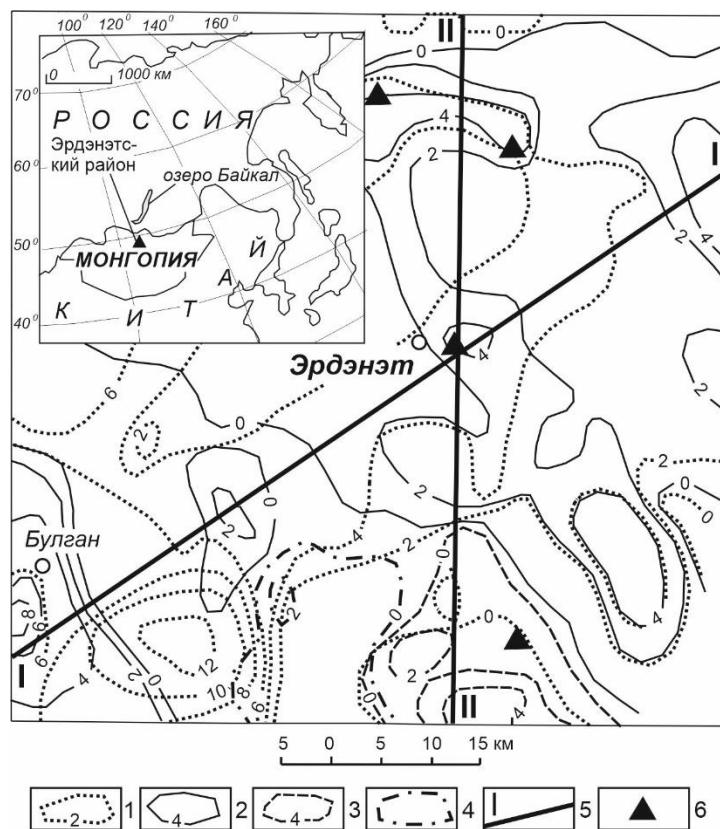


Рис. 2. Схема строения верхней части земной коры Эрдэнэтского района:

- 1 – глубины допермского фундамента; 2 – толщины пермо-триасовых гранитоидных тел;
3 – толщины пермо-триасовых диоритовых тел; 4 – толщины раннепалеозойских гранитов;
5 – линии разрезов (см. рис. 1); 6 – медно-молибденовые рудопроявления

Fig. 2. Diagram of the Erdenet district upper crust structure:

- 1 – depths of Pre-Permian basement; 2 – thicknesses of Permian-Triassic granitoid bodies;
3 – thicknesses of Permian-Triassic diorite bodies; 4 – thicknesses of Early Paleozoic granites;
5 – cross-section lines (see Fig. 1); 6 – sites of copper-molybdenum ore occurrence

района работ. Через центральную часть района в северо-восточном направлении протягивается сравнительно широкое относительное поднятие, в пределах которого глубина прогиба уменьшается до 2–3 км (см. рис. 2). Судя по элементам залегания эффузивных толщ, определенным при геологической съемке, складчатая структура пород хануйской серии представляется более сложной, чем строение поверхности фундамента. Простирание складок, в которые смяты толщи эффузивов, в большинстве случаев примерно соответствует направлению изолиний глубин фундамента, но ширина этих складок значительно меньше, а углы падения пород на их крыльях гораздо круче, чем у охарактеризованных выше впадин и поднятий. Очевидно, в процессе складчатости в обстановке сжатия происходили срывы по горизонтальным плоскостям и эффузивные толщи сминались дис-

гармонично по отношению к поверхности фундамента. На существование сжатия указывает выявленный при интерпретации гравиметрических данных надвиг гранодиоритов фундамента на образования хануйской серии на севере исследованного района (см. рис. 2). Петрологическая однородность многочисленных сравнительно мелких выходов гранитоидов второй фазы селенгинского комплекса позволяла геологам еще до проведения гравиметрических работ предполагать, что эти гранитоиды на глубине объединяются в довольно крупные интрузивные массивы [7].

Интерпретация гравиметрических данных показала, что гранитоидные массивы на некоторой глубине сливаются в единое интрузивное тело, то есть горизонтальные размеры гранитоидных plutонов на определенной глубине гораздо больше, чем размеры их экспонированных частей (см. рис. 2).



Гранитоиды селенгинского комплекса слагают сильно уплотненные по вертикали интрузивные тела (см. рис. 1). По-видимому, при становлении этих интрузивов использовались субгоризонтальные ослабленные зоны, соответствующие в большинстве случаев стратиграфическим границам толщ, входящих в хануйскую серию.

Обращает на себя внимание интересная особенность морфологии интрузивных тел: на участках, где их мощность увеличивается, отмечаются, как правило, и выступы кровли, в которых гранитоиды обнажаются в современном денудационном срезе, и прогибы их подошвы (см. рис. 1). С одной стороны, такая закономерность хорошо соответствует концепции о «всплытии» гранитоидной магмы сквозь более плотные вмещающие породы [22]. Большие недостатки масс, сосредоточенные в раздувах интрузивного тела, могли обеспечивать и большую подъемную силу, что приводило к формированию выступов кровли. С другой стороны, прогибы подошвы, по всей вероятности, соответствуют местам поступления магмы с больших глубин, то есть эти углубления маркируют положение подводящих каналов. Последнее утверждение относится прежде всего к локальным углублениям подошвы, которые выделяются в пределах ее узких протяженных прогибов. Сами подводящие каналы гравиметрией не фиксируются, по-видимому, из-за их небольшого диаметра. Можно полагать, что гранитоидная магма внедрялась по узким каналам из глубоких очагов под действием сил сжатия. Архимедовы же силы могли оказывать некоторое влияние на морфологию интрузивов в процессе их становления.

Весьма интересной в структурном отношении представляется узкая полоса повышенной толщины гранитоидов, которая протягивается в северо-западном направлении непосредственно через Эрдэнэтское месторождение (см. рис. 2.). Эта полоса совпадает с установленной по геологическим данным зоной разломов. Очевидно, к указанной зоне были приурочены подводящие каналы, по которым гранитоидная магма в конце перми и начале триаса внедрялась в толщи эфузивов хануйской серии. Судя по конфигурации полосы

повышенной толщины тела гранитоидов, в 20 км к северу от г. Эрдэнэт эта зона пересекается разломом субширотного простирания. Аналогичное субширотное ответвление утолщенной части тела гранитоидов установлено в 15 км к юго-востоку от Эрдэнэтского массива (см. рис. 2). По-видимому, к этим двум субширотным разломам также были приурочены подводящие каналы.

В районе исследований фиксируются части двух крупных диоритовых массивов, относимых к первой фазе селенгинского комплекса. Один из них (на юге района) пересекается р. Орхон. Он прорывает породы допермского фундамента. Второй массив (северо-запад района) приурочен, по-видимому, к межформационной границе между фундаментом и хануйской серией. Оба тела имеют уплотненную по вертикали форму. В южной своей части первый интрузив значительно утолщается, что, видимо, свидетельствует о наличии в этом месте подводящего канала (см. рис. 2). Кроме этого, на исследованной площади картируется ряд выходов диоритов и габбро-диоритов, относимых к селенгинскому и раннепалеозойскому комплексам. Однако эти тела не отражаются в гравитационном поле, что связано, очевидно, с их небольшими объемами.

Раннепалеозойские гранитоиды, принимающие участие в строении выступа фундамента на юге района, создают заметный гравитационный минимум. Судя по результатам интерпретации наблюдаемой аномалии, тело древних гранитов имеет небольшую вертикальную мощность. Оно могло возникнуть в результате дифференциации магмы гранодиоритового состава.

Малые интрузии гранодиорит-порфиров и гранит-порфиров, с которыми связаны медно-молибденовые месторождения и рудопроявления, не отражаются в гравитационных аномалиях, выявленных в результате среднемасштабной съемки. Эти магматические тела, относимые некоторыми исследователями к самостоятельному эрдэнэтскому комплексу, являются более молодыми, чем рассмотренные выше интрузии селенгинского комплекса. Представляет интерес определение закономерностей положения малых рудоносных интрузий относительно тех элементов строения



верхней части земной коры, которые выявлены в результате интерпретации гравитационных аномалий и, в частности, относительно морфологических особенностей plutонов селенгинского комплекса.

Само Эрдэнэтское медно-молибденовое месторождение приурочено к локальному гравитационному минимуму, который интерпретируется как утолщение тела селенгинских гранитоидов. Остальные медно-молибденовые рудопроявления, также связанные с малыми интрузиями эрдэнэтского комплекса, приурочены к локальному углублению подошвы массива гранитоидов (см. рис. 2).

Как уже отмечалось выше, такие локальные углубления подошвы гранитоидных интрузивов соответствуют положению подводящих магму каналов. Следовательно, рудоносные малые интрузии внедрялись примерно в тех же местах, где существовали подводящие каналы гранитоидных интрузий селенгинского комплекса. Так как гранодиорит-порфиры и гранит-порфиры внедрялись сразу же после становления plutонов второй фазы этого комплекса, можно полагать, что здесь имеет место не только тектоническая унаследованность (приуроченность к одним и тем же разломам и местам их пересечения). Источниками малых интрузий могли являться остаточные расплавы тех же очагов, в которых генерировалась магма интрузий селенгинского комплекса. С этой точки зрения целесообразность выделения самостоятельного эрдэнэтского комплекса представляется спорной. Геофизические данные о пространственной близости подводящих каналов указанных

интрузий позволяют лишь поставить вопрос о такой целесообразности. Решение этого вопроса возможно на основе комплексного анализа петрологических и геохимических данных.

Заключение

Вывод о пространственной близости подводящих каналов рудоносных малых интрузий и крупных гранитоидных тел селенгинского комплекса представляется достаточно определенным и относится к шести участкам медно-молибденового оруденения из семи, известных в настоящее время. Исключением является участок, расположенный в южной части района (см. рис. 2).

Оруденение здесь также связано с малыми гранодиорит-порфировыми интрузиями, но последние приурочены к краевой части диоритового plutона, относимого к селенгинскому комплексу. Утолщение тела диоритов, которое можно интерпретировать как признак положения подводящего канала, находится в шести километрах юго-западнее рудопроявления. Возможно, подводящие каналы гранодиорит-порфировых интрузий иногда могли значительно отклоняться от вертикального направления. На основании изложенного выше можно полагать, что рудоносные порфировые интрузии приурочены к довольно широким (около 10 км) зонам, расположенным над углублениями подошвы всех интрузий селенгинского комплекса (как гранитоидного, так и диоритового состава). В этих зонах рекомендуется сосредоточить поисково-съемочные работы крупного масштаба.

Список источников

1. Турутанов Е. Х. Морфология мезозойских гранитных plutонов Монголии по гравиметрическим данным. Иркутск: Изд-во ИрГТУ, 2012. 223 с.
2. Мезозойская и кайнозойская тектоника и магматизм Монголии / отв. ред. А. Л. Яншин. М.: Наука, 1975. 308 с.
3. Зорин Ю. А., Беличенко В. Г., Турутанов Е. Х., Мордвинова В. В., Кожевников В. М., Хозбаяр П. [и др.]. Байкало-Монгольский трансект // Геология и геофизика. 1994. Т. 35. № 7-8. С. 94–110.
4. Тумуртогоо О. Тектоника и история развития Орхонской впадины (север Центральной Монголии) // Геотектоника. 1972. № 3. С. 61–74.
5. Нагибина М. С. Тектоника и магматизм Монголо-
- Охотского пояса. М.: Изд-во АН СССР, 1963. 464 с.
6. Моссаковский А. А., Тумуртогоо О. Верхний палеозой Монголии. М.: Наука, 1976. 127 с.
7. Геология Монгольской Народной Республики. Т. II. Магматизм, метаморфизм, тектоника / отв. ред. Р. А. Хасин [и др.]. М.: Недра, 1973. 752 с.
8. Геология Монгольской Народной Республики. Т. I. Стратиграфия / отв. ред. Н. А. Маринов. М.: Недра, 1973. 582 с.
9. Сотников В. И. Закономерности размещения медно-молибденового оруденения Монголии // Эндогенные рудные формации: труды Советско-Монгольской геологической экспедиции / В. П. Сотников, А. П. Берзина, Д. Болд. Вып. 33. М.: Наука, 1984. С. 12–18.



10. Дугараа П., Арвисбаатар Н. Петроплотностная характеристика пород Жанчивланского рудного узла и его окрестностей // Вопросы геологии и полезных ископаемых Центральной и Восточной Монголии: сб. науч. тр. Улан-Батор: Изд-во МонГУ, 1982. С. 11–13.
11. Зорин Ю. А., Новоселова М. Р., Рогожина В. А. Глубинная структура территории МНР. Новосибирск: Наука, 1982. 94 с.
12. Зорин Ю. А. Новейшая структура и изостазия Байкальской riftовой зоны и сопредельных территорий. М.: Наука, 1971. 168 с.
13. Турутанов Е. Х. Аномалии силы тяжести, глубинная структура и геодинамика Монголо-Сибирского региона: монография. Иркутск: Изд-во ИРНИТУ, 2018. 182 с.
14. Зорин Ю. А., Письменный Б. М., Новоселова М. Р., Турутанов Е. Х. Декомпенсационные аномалии силы тяжести // Геология и геофизика. 1985. Т. 26. № 8. С. 104–108.
15. Буяントогх Б., Турутанов Е. Х., Канайкин В. С. Структура земной коры Улан-Баторского района Монголии по гравиметрическим данным // Геодинамика и тектонофизика. 2019. Т. 10. № 3. С. 585–602. <https://doi.org/10.5800/GT-2019-10-3-0428>.
16. Stephanson O., Johnson K. Granite diapirism in the Rum Jungle area, Northern Australia // Precambrian Research. 1976. Vol. 3. Iss. 2. P. 159–185. [https://doi.org/10.1016/0301-9268\(76\)90031-0](https://doi.org/10.1016/0301-9268(76)90031-0).
17. Ramodass G., Ramaprasada Rao I. B., Himabindu D. Crustal configuration of the Dharwar craton, India, based on joint modeling of regional gravity and magnetic data // Journal of Asian Earth Sciences. 2006. Vol. 26. Iss. 5. P. 437–448. <https://doi.org/10.1016/j.jseaes.2004.10.005>.
18. Oclsner C. Die gravimetrischen Spezialvermessungen des Gebietes Geger // Freiberger Forschungs. Ehrenfriedersdorf. 1963. N. 167. S. 85–93.
19. Biehler S. A., Bonini W. E. Geophysical interpretation of the Boulder batholith, Montana // Transactions of the American Geophysical Union. 1966. Vol. 47. Iss. 1. P. 192.
20. Campbell D. S., Jonson D. J. Bouguer gravity study of Enumclaw / Pinnacle Peak, Washington // Northwest Science. 1982. Vol. 58. Iss. 2. P. 90–100.
21. Eggler D. H. Gravity survey of the Livermore-Tie Siding area, Colorado-Wyoming // Mountain Geologist. 1967. Vol. 4. Iss. 3. P. 109–114.
22. Турутанов Е. Х. Ангаро-Витимский батолит: форма и размеры по гравиметрическим данным // Доклады Академии наук. 2011. Т. 440. № 6. С. 815–818.

References

1. Turutanov E. Kh. *Morphology of Mongolian Mesozoic granite plutons according to gravimetric data*. Irkutsk: Irkutsk State Technical University; 2012. 223 p. (In Russ.).
2. Yanshin A. L. *Mesozoic and Cenozoic tectonics and magmatism of Mongolia*. Moscow: Nauka; 1975. 308 p. (In Russ.).
3. Zorin Yu. A., Belichenko V. G., Turutanov E. Kh., Mordvinova V. V., Kozhevnikov V. M., Khozbayar P., et al. Baikal-Mongolia transect. *Geologiya i geofizika*. 1994;35(7-8):94-110. (In Russ.).
4. Tumurtogoo O. Tectonics and development history of the Orkhon valley (north of the Central Mongolia). *Geotektonika*. 1972;3:61-74. (In Russ.).
5. Nagibina M. S. *Tectonics and magmatism of the Mongolia-Okhotsk belt*. Moscow: Academy of Sciences of the Soviet Union; 1963. 464 p. (In Russ.).
6. Mossakovskii A. A., Tomurtogoo O. *The Upper Paleozoic of Mongolia*. Moscow: Nauka; 1976. 127 p. (In Russ.).
7. Khasin R. A., et al. *Geology of the Mongolian People's Republic. Vol. 2. Magmatism, metamorphism, tectonics*. Moscow: Nedra; 1973. 752 p. (In Russ.).
8. Marinov N. A. *Geology of the Mongolian People's Republic. Vol. 1. Stratigraphy*. Moscow: Nedra; 1973. 582 p. (In Russ.).
9. Sotnikov V. I. Location regularities of copper-molybdenum metallization of Mongolia. In: Sotnikov V. P., Berzina A. P., Bold D. *Endogenye rudnye formatsii: trudy Sovetskogo-Mongolskoi geologicheskoi ekspeditsii. Endogenous ore formations: proceedings of the Soviet-Mongolian Geological Expedition*. Iss. 33. Moscow: Nauka; 1984. p.12–18. (In Russ.).
10. Dugaraa P., Arvisbaatar N. Petro-density characteristics of rocks of the Zhanchivlansky ore cluster and its environs. In: *Voprosy geologii i poleznykh iskopaemykh Tsentral'noi i Vostochnoi Mongolii = Questions of geology and minerals in Central and Eastern Mongolia*. Ulan-Bator: National University of Mongolia; 1982. p.11–13. (In Russ.).
11. Zorin Yu. A., Novoselova M. R., Rogozhina V. A. *Deep structure of the Mongolian People's Republic territory*. Novosibirsk: Nauka; 1982. 94 p. (In Russ.).
12. Zorin Yu. A. *The recent structure and isostasy of the Baikal rift zone and adjacent areas*. Moscow: Nauka; 1971. 168 p. (In Russ.).
13. Turutanov E. Kh. *Anomalies of gravity force, deep structure and geodynamics of the Mongol-Siberian region*. Irkutsk: Irkutsk National Research Technical University; 2018. 182 p. (In Russ.).
14. Zorin Yu. A., Pis'mennyi B. M., Novoselova M. R., Turutanov E. Kh. Decomposition anomalies of the gravity force. *Geologiya i geofizika*. 1985;26(8):104-108. (In Russ.).
15. Buyantogtokh B., Turutanov E. K., Kanaikin V. S. Crustal structure of the Ulaanbaatar region, Mongolia according to gravimetric data. *Geodinamika i tektonofizika = Geodynamics & Tectonophysics*. 2019;10(3):585-602. (In Russ.). <https://doi.org/10.5800/GT-2019-10-3-0428>.
16. Stephanson O., Johnson K. Granite diapirism in the Rum Jungle area, Northern Australia. *Precambrian Research*. 1976;3(2):159-185. [https://doi.org/10.1016/0301-9268\(76\)90031-0](https://doi.org/10.1016/0301-9268(76)90031-0).
17. Ramodass G., Ramaprasada Rao I. B., Himabindu D. Crustal configuration of the Dharwar craton, India, based on joint modeling of regional gravity and magnetic data. *Journal of Asian Earth Sciences*. 2006;26(5):437-448. <https://doi.org/10.1016/j.jseaes.2004.10.005>.
18. Oclsner C. Special gravimetric measurements in the Geger area. *Issledovanie Fraibergera. Ehrenfriedersdorf*. 1963;167:85-93. (In Germ.).



19. Biehler S. A., Bonini W. E. Geophysical interpretation of the Boulder batholith, Montana. *Transactions of the American Geophysical Union*. 1966;47(1):192.
20. Campbell D. S., Jonson D. J. Bouguer gravity study of Enumclaw / Pinnacle Peak, Washington Northwest Science. 1982;58(2):90-100.
21. Eggler D. H. Gravity survey of the Livermore-Tie Siding area, Colorado-Wyoming. *Mountain Geologist*. 1967;4(3):109-114.
22. Turutanov E. Kh. Angara-Vitim batholith: shape and size according to gravimetric data. *Doklady Akademii nauk*. 2011;440(6):815-818. (In Russ.).

Информация об авторах / Information about the authors



Турутанов Евгений Хрисанфович,
доктор геолого-минералогических наук,
заведующий Лабораторией комплексной геофизики,
Институт земной коры СО РАН,
г. Иркутск, Россия,
e-mail: tur@crust.irk.ru.

Evgeny K. Turutanov,
Dr. Sci. (Geol. & Mineral.),
Head of the Laboratory of Integrated Geophysics,
Institute of the Earth's Crust, Siberian Branch of the Russian Academy of Sciences,
Irkutsk, Russia,
tur@crust.irk.ru.



Канайкин Виктор Степанович,
кандидат геолого-минералогических наук, доцент,
доцент кафедры прикладной геологии, геофизики и геоинформационных систем,
Институт недропользования,
Иркутский национальный исследовательский технический университет,
г. Иркутск, Россия,
kanvs@yandex.ru.

Viktor S. Kanaykin,
Cand. Sci. (Geol. & Mineral.), Associate Professor,
Associate Professor of the Department of Applied Geology,
Geophysics and Geoinformation Systems,
Institute of Subsoil Use,
Irkutsk National Research Technical University,
Irkutsk, Russia,
kanvs@yandex.ru.

Вклад авторов / Contribution of the authors

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

Конфликт интересов / Conflict of interests

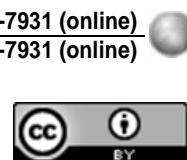
Авторы заявляют об отсутствии конфликта интересов.
The authors declare no conflicts of interests.

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

Информация о статье / Information about the article

Статья поступила в редакцию 06.07.2021; одобрена после рецензирования 14.10.2021; принята к публикации 19.11.2021.

The article was submitted 06.07.2021; approved after reviewing 14.10.2021; accepted for publication 19.11.2021.



Научная статья

УДК 550.41+551.24+553.061

<https://doi.org/10.21285/2686-9993-2021-44-4-382-396>

Геолого-геофизические исследования российской Арктики для поисков новых нефтегазовых регионов

Андрей Леонидович Харитонов^a^aИнститут земного магнетизма, ионосферы и распространения радиоволн
им. Н. В. Пушкова РАН, г. Москва, Россия

Резюме. Российские арктические и субарктические регионы, по мнению многих специалистов, проводивших там исследования, должны быть богаты различными полезными ископаемыми, такими как, например, золото, олово, уголь, кимберлиты и особенно нефть и газ. Цель данной работы заключается в том, чтобы показать возможности региональных геолого-геофизических (аэрокосмических) методов исследования тектонических и морфологических особенностей строения недр Арктического региона, позволяющих провести региональное изучение потенциальных ресурсов нефти и газа как в шельфовых зонах Арктики, так и в горных или болотистых субарктических регионах Восточной Сибири, труднодоступных для некоторых других методов геологоразведки (например, сейсморазведки). В настоящей статье представлены результаты проделанной работы, которые могут позволить в совокупности с возможностями других геолого-геофизических методов проводить более качественные аэрокосмические исследования тектонического строения Арктического региона. В частности, в статье представлена блок-схема пакета компьютерных программ, используемых для математической обработки и геолого-геофизической интерпретации аэрокосмических измерений, проводимых на территории Арктики и Субарктики. Полученные результаты относительно морфологических (концентрических) структур центрального типа, образованных в результате возникновения палеомантийных плюмов, сопоставлены с независимыми данными геолого-геофизических разрезов земной коры, построенных в зонах расположения этих структур. Проведено сравнение полученных данных по нефтегазоперспективности некоторых регионов Арктики и Субарктики с результатами прогнозов других исследователей и организаций.

Ключевые слова: региональное тектоническое строение, земная кора, Арктика, Субарктика, потенциальная нефтегазоносность

Для цитирования: Харитонов А. Л. Геолого-геофизические исследования российской Арктики для поисков новых нефтегазовых регионов // Науки о Земле и недропользование. 2021. Т. 44. № 4. С. 382–396. <https://doi.org/10.21285/2686-9993-2021-44-4-382-396>.

Original article

Geologic and geophysical exploration of the Russian Arctic in search for new oil and gas regions

Andrey L. Kharitonov^a^aPushkov Institute of Terrestrial Magnetism, Ionosphere and Radio Wave Propagation,
Russian Academy of Sciences, Moscow, Russia

Abstract. Many specialists who studied Russian Arctic and subarctic regions consider that the latter should be rich in various minerals, for example, gold, tin, coal, kimberlites and, especially in oil and gas. The purpose of the article is to show the potential of regional geological and geophysical (remote sensing) methods for the study of tectonic and morphological features of the structure of the Arctic region subsoil allowing to conduct a regional study of potential resources of oil and gas in the Arctic shelf areas as well as in the mountainous or swampy Subarctic regions of Eastern Siberia inaccessible for other exploration methods (for example, seismic surveying). This article presents the results of the conducted scientific work, which together with other geological and geophysical methods will make it possible to carry out better aerospace studies of the tectonic structure of the Arctic region. In particular, the article introduces a block diagram of a computer software package for mathematical processing and the geological and geophysical interpretation of remote sensing data obtained as a result of measurements over the Arctic and Subarctic regions. The findings obtained on morphological (concentric) structures of the central type formed as a result of the occurrence of paleo-mantle plumes are compared with



independent data on geological and geophysical sections of the earth's crust constructed in the zones where these structures are located. The obtained data on the oil and gas potential of some regions of the Arctic and Subarctic are compared with the results of forecasts made by other researchers and organizations.

Keywords: regional tectonic structure, earth crust, the Arctic, the Subarctic, oil and gas potential

For citation: Kharitonov A. L. Geologic and geophysical exploration of the Russian Arctic in search for new oil and gas regions. *Nauki o Zemle i nedropol'zovanie = Earth sciences and subsoil use.* 2021;44(4):382-396. (In Russ.). <https://doi.org/10.21285/2686-9993-2021-44-4-382-396>.

Введение

В настоящее время очень важно привлечь внимание крупных геолого-разведочных организаций и нефтегазовых компаний Российской Федерации к возможностям отечественной науки для проведения региональных геолого-геофизических исследований недр Арктики и Субарктики, позволяющих изучить тектонические особенности земной коры и мантии в труднодоступных для других геофизических методов геологоразведки регионах Арктики. Применение спутниковых методов дистанционного зондирования Земли, аэромагнитных и других аэрокосмических геофизических методов может дать возможность выделить наиболее перспективные нефтегазовые регионы российской Арктики и спланировать систему проведения дальнейших детальных геолого-геофизических работ в этом очень сложном по геолого-тектоническому строению регионе. В качестве геолого-геофизических методов исследования предлагается использовать накопленный опыт российских ученых по математической обработке и геофизической интерпретации результатов аэрокосмических съемок¹ [1–8] для изучения глубинного строения недр Арктического региона и геолого-геофизического прогнозирования нефте- и газоперспективных областей на основе имеющихся материалов спутниковых съемок по всей территории Арктического региона.

По мнению известных исследователей, таких как Б. М. Валяев [9], В. Ю. Визе [10], И. С. Грамберг [11], А. М. Яншин [12], С. В. Обручев [13], Р. Б. Сейфуль-Мулюков [14], В. Л. Сывороткин [15], А. И. Тимурзиев [16] и многие другие, Арктический регион является очень пер-

спективным для поисков и разведки месторождений различных полезных ископаемых (например, нефти и газа, золота, кимберлитов). Если анализировать впадину Арктического региона с точки зрения наиболее актуальных в настоящее время для всего мирового сообщества углеводородных ресурсов, то стоит отметить, что эту территорию вместе с акваторией Северного Ледовитого океана часто называют Арктическим нефтегазовым бассейном, включающим в качестве составных частей не только морские шельфовые зоны, но и субарктические регионы Европы и Восточной Сибири, в которых уже открыто значительное количество месторождений жидких и газообразных углеводородов [9, 16]. Тем не менее до настоящего времени региональных геолого-геофизических исследований в шельфовых зонах Северного Ледовитого океана, в северных районах Восточной Сибири и Дальнего Востока было явно недостаточно для успешного решения задач по глубинному изучению и анализу перспективности восточных регионов российской Арктики [16], а также для определения оптимальной постановки детальных работ по поискам и разведке различных месторождений углеводородов (нефти, газа).

Геолого-геофизические исследования недр Северного Ледовитого океана в разное время проводились различными российскими научными² [10, 17] и многими другими организациями с помощью дрейфующих полярных станций «Северный полюс», расположенных на льдинах и вдоль одиночных арктических геотрекеров атомных ледоколов «Арктика», а также с помощью полярной авиации вдоль

¹ Соловьев В. В. Структуры центрального типа территории СССР по данным геолого-геоморфологического анализа: объяснительная записка к Карте морфоструктур центрального типа территории СССР масштаба 1:10000000. Л.: Изд-во ВСЕГЕИ, 1978. 111 с.

² Каминский В. Д. Глубинное строение Центрального Арктического бассейна (в связи с обоснованием внешней границы континентального шельфа Российской Федерации и оценкой углеводородных ресурсов): дис. ... д-ра геол.-минерал. наук: 25.00.10. СПб., 2009. 245 с.

сети параллельных профилей (рис. 1). К сожалению, даже самые мощные и лучшие в мире отечественные ледокольные суда с атомными двигателями и полярная авиация могут относительно свободно выполнять геофизические измерения в пределах акватории Северного Ледовитого океана лишь в осенне-летний сезон и лишь в благоприятные по погодно-геофизическим (солнечная радиация из-за истощения озонового слоя) [15] и температурным условиям периоды, когда ледовая обстановка позволяет проводить морские геолого-геофизические исследования.

Материалы и методы исследования

В современных условиях, когда имеются определенные экономические трудности и сложности с поставкой импортного оборудования для российских геолого-разведочных и нефтедобывающих компаний [16], самыми оперативными и относительно недорогими отечественными геолого-геофизическими методами поисков и разведки крупных месторождений углеводородов на территории российского сектора Арктики могут быть аэрокосмические методы геофизических исследований.

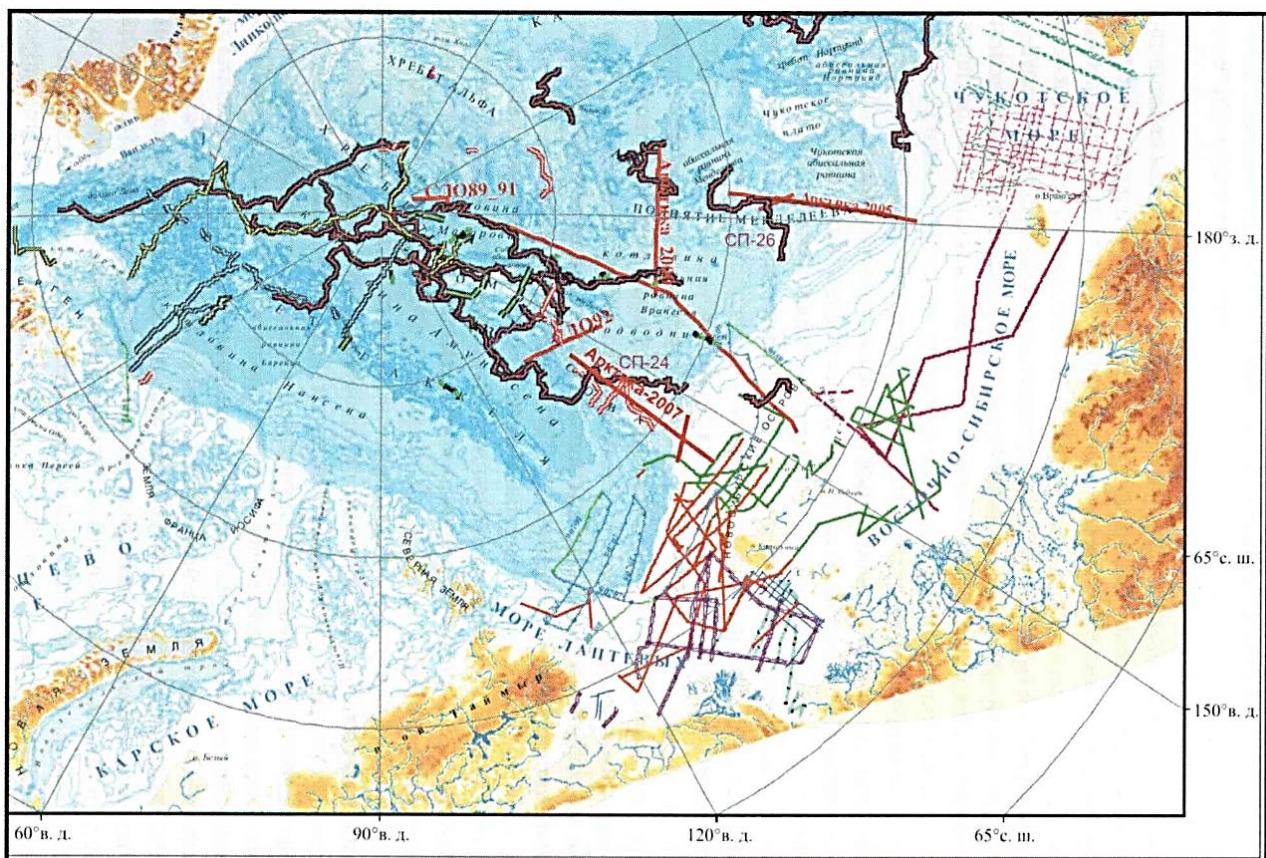


Рис. 1. Схема проводимых геолого-геофизических исследований на акватории Северного Ледовитого океана в российском секторе Арктического региона³

Коричневыми кривыми обозначены исследования, проведенные с помощью научных станций на дрейфующих льдах «Северный полюс». Красными жирными линиями выделены геотраверсы ледокола «Арктика». Оранжевыми, зелеными, лиловыми линиями показаны маршруты аэромагнитных съемок в пределах Северного Ледовитого океана

Fig. 1. Diagram of conducted geological and geophysical studies in the water area of the Arctic Ocean in the Russian sector of the Arctic region³

Brown curves indicate researches carried out on the basis of the scientific stations on drifting ice "North Pole".
Bold red lines indicate geotraverses of the icebreaker "Arktika". Orange, green, purple lines show aeromagnetic survey routes within the Arctic Ocean

³ Каминский В. Д. Глубинное строение Центрального Арктического бассейна (в связи с обоснованием внешней границы континентального шельфа Российской Федерации и оценкой углеводородных ресурсов): дис. ... д-ра геол.-минерал. наук: 25.00.10. СПб., 2009. 245 с.



С их помощью можно проводить, например, выделение линейных региональных магнитных аномалий (магнитных линеаментов) и связанных с ними крупных тектонических разломов⁴. Только спутниковые данные (данные дистанционного зондирования Земли⁵, магнитные [6–8, 18] и геотермические измерения⁶) могут позволить осуществлять бесперебойные всесезонные длительные повторные измерения (в течение нескольких лет) значений высоты рельефа поверхности Земли, аномалий теплового потока, а также всех ортогональных (H , D , Z) составляющих геомагнитного поля [3–5], которые можно использовать для изучения глубинного тектонического и геодинамического строения земной коры и мантии этих очень перспективных, но труднодоступных для наземных геолого-геофизических съемок арктических и субарктических районов Российской Федерации со сложным рельефом земной поверхности и плохими погодно-климатическими условиями.

Для математической обработки и геолого-геофизической интерпретации аэрокосмических данных была разработана система компьютерных программ, включающая различные современные спектральные [3, 5, 7, 19], корреляционные [6, 8] и другие методы анализа [4] измеренных цифровых геомагнитных данных, позволяющие исключать ошибки измерений и разделять измеренное поле на ортогональные составляющие, связанные с различными физическими слоями Земли (рис. 2).

В основном были использованы данные работающих на орбите Земли низкоорбитальных космических аппаратов (MAGSAT [18], CHAMP) [5], измеряющих значения модуля T и ортогональных компонент X , Y , Z вектора геомагнитного поля над всей поверхностью Арктического региона и в частности над труднодоступной для других видов геолого-геофи-

зических исследований акваторией Северного Ледовитого океана.

Результаты исследования и их обсуждение

Статистические данные о расположении месторождений нефти и газа по всей поверхности Земли [10] показывают, что большинство месторождений газообразных и жидких углеводородов (газ, газоконденсат, нефть) сосредоточено в окрестностях глубинных разломов, связанных с палеорифтовыми [16], палеосубдукционными (надвиговыми) [16, 20], палеоплюм-тектоническими [1, 2] зонами. Поэтому автор данной статьи придает такое большое значение определению местоположения тектонических разломов, связанных с палеомантийными плюм-тектоническими структурами [2], а также связанных с ними месторождений нефти и газа на территории российской Арктики.

На рис. 3 наблюдается наличие множества (39–49) морфологических структур центрального типа (МСЦТ) разных пространственных размеров, выделенных по данным дистанционного зондирования Земли⁷ на территории восточной части Российской Федерации (Восточно-Сибирский, Якутский, Чукотский регионы). В том числе в интересующих нас районах шельфовых зон восточной Арктики по разным геолого-геофизическим (геотермальным, морфоструктурным и другим) данным автором было выделено две достаточно крупные почти кольцевые МСЦТ (39 и 45) диаметром более 500 км, простирающиеся примерно от 154-го до 174-го градуса восточной долготы, одна из которых (Северо-Чукотская МСЦТ (39)) расположена на берегу Северного Ледовитого океана с центром в районе острова Врангеля, а другая (Восточно-Сибирская МСЦТ (45)) – на шельфе, севернее

⁴ Схема зон глубинных разломов территории СССР (по геофизическим данным). М-б 1:10000000 / сост. Е. М. Ананьев [и др.]; ред. Д. М. Мильштейн. М.: Изд-во Мингео СССР, 1979. 1 л.

⁵ Соловьев В. В. Структуры центрального типа территории СССР по данным геолого-геоморфологического анализа: объяснительная записка к Карте морфоструктур центрального типа территории СССР масштаба 1:10000000. Л.: Изд-во ВСЕГЕИ, 1978. 111 с.

⁶ Карта теплового потока территории СССР и сопредельных районов. М-б 1:10000000 / гл. ред. Я. Б. Смирнов. М.: Изд-во ГУГК, 1980. 1 л.

⁷ Соловьев В. В. Структуры центрального типа территории СССР по данным геолого-геоморфологического анализа: объяснительная записка к Карте морфоструктур центрального типа территории СССР масштаба 1:10000000. Л.: Изд-во ВСЕГЕИ, 1978. 111 с.

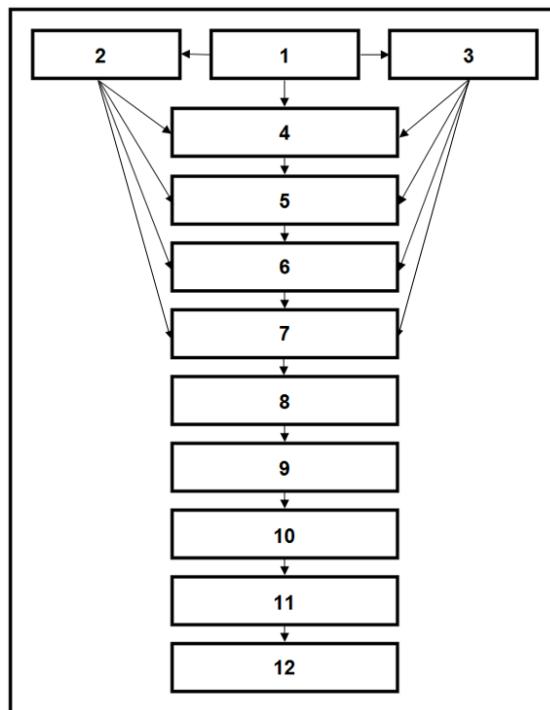


Рис. 2. Блок-схема пакета компьютерных программ для математической обработки и геолого-геофизической интерпретации аэрокосмических геомагнитных измерений [19]:

1 – измеренное магнитное поле; 2 – магнитное поле T - и X -, Y -, Z -компонент, измеренных на профилях в одном направлении (восходящие витки); 3 – магнитное поле T - и X -, Y -, Z -компонент, измеренных на профилях в противоположном направлении (нисходящие витки); 4 – программа выявления и исключения магнитовозмущенных витков искусственного спутника Земли (компьютерная программа «Меос»); 5 – программа расчета и исключения нормального магнитного поля (компьютерная программа «Синт»); 6 – программа расчета и исключения магнитного поля, генерируемого магнитосферным кольцевым током (компьютерная программа «Колток»); 7 – программа расчета и исключения магнитного поля, связанного с ионосферой (компьютерная программа «Ионтренд»); 8 – программа перехода от неравномерной сети измерений магнитного поля вдоль профилей к равномерной сети измерений по пространству (компьютерная программа «Интерполяция»); 9 – программа построения карт аномального магнитного поля (компьютерная программа «Карта»); 10 – программа определения геометрической формы источника аномального магнитного поля (компьютерная программа «Форма»); 11 – программа расчета расстояния до источника аномального магнитного поля (компьютерная программа «Глубина»); 12 – программа определения магнитных характеристик среды (компьютерная программа «Намагниченность»)

Fig. 2. Block diagram of the software package for mathematical processing and geological and geophysical interpretation of remote geomagnetic sensing [19]:

1 – measured magnetic field; 2 – magnetic field of T - and X -, Y -, Z -components measured on profiles in one direction (ascending turns); 3 – magnetic field of T - and X -, Y -, Z -components measured on profiles in the opposite direction (descending turns); 4 – program for detection and elimination of magnetically disturbed orbits of an artificial Earth satellite (Meos computer program); 5 – program for calculation and elimination of the normal magnetic field (Sint computer program); 6 – program for calculation and elimination of the magnetic field generated by the magnetospheric ring current (Koltok computer program); 7 – program for calculation and elimination of the magnetic field associated with the ionosphere (Iontrend computer program); 8 – transition program from an uneven measurement network of the magnetic field along the profiles to a uniform measurement network in space (Interpolation computer program); 9 – program for building anomalous magnetic field maps (Karta (map) computer program); 10 – program for determining the geometric shape of the source of anomalous magnetic field (Forma (form) computer program); 11 – program for calculating the distance to the source of anomalous magnetic field (Glubina (depth) computer program); 12 – program for determining magnetic characteristics of the medium (Namagnichenost (magnetization) computer program)

Медвежьих островов. На рис. 3 также выделены и другие «дочерние» МСЦТ меньшего диаметра (Шмидтовская МСЦТ (39а), Анадырская МСЦТ (39б), Колючинская МСЦТ (39с)), расположенные на берегу Анадырского залива,

а также Колючинской губы. На этой карте имеются и крупные субарктические континентальные МСЦТ (Омоловская (43), Среднеяянская (44), Устьнерская (47)). Известно, что большинство МСЦТ образовались в доархейские



(нуклеарные) периоды эволюционного преобразования Земли [1]. Глубинное строение всех выделенных на представленной карте МСЦТ, уходящих своими «корнями» в мантию, подтверждается данными расчетов [2]. В соответствии с работами [2, 9] такие глубокопогруженные структуры относят к категории палеомантийных термальных плюмов (диапиров). Кроме того, на рис. 3 можно видеть фрагменты реологической сети диагональных к географическим координатам региональных тектонических разломов земной коры, секущих МСЦТ. Существует мнение, что эти тектонические разломы возникли в постархейские тектонические периоды в результате по-

степенного преобразования субвертикальных (нуклеарных) эндогенных процессов [1] в субгоризонтальные геодинамические процессы, характерные для глобальной тектоники литосферных плит Протерозойского, Палеозойского, Мезозойского геохронологических периодов [21]. Поэтому правильные концентрические формы некоторых МСЦТ за счет тектонических напряжений и подвижек, возникавших на разломных границах блоков палео-литосферных плит этих регионов, были частично деформированы и разбиты на отдельные сектора пост-архейскими глубинными тектоническими разломами (примером может служить Устьнерская МСЦТ (47)).

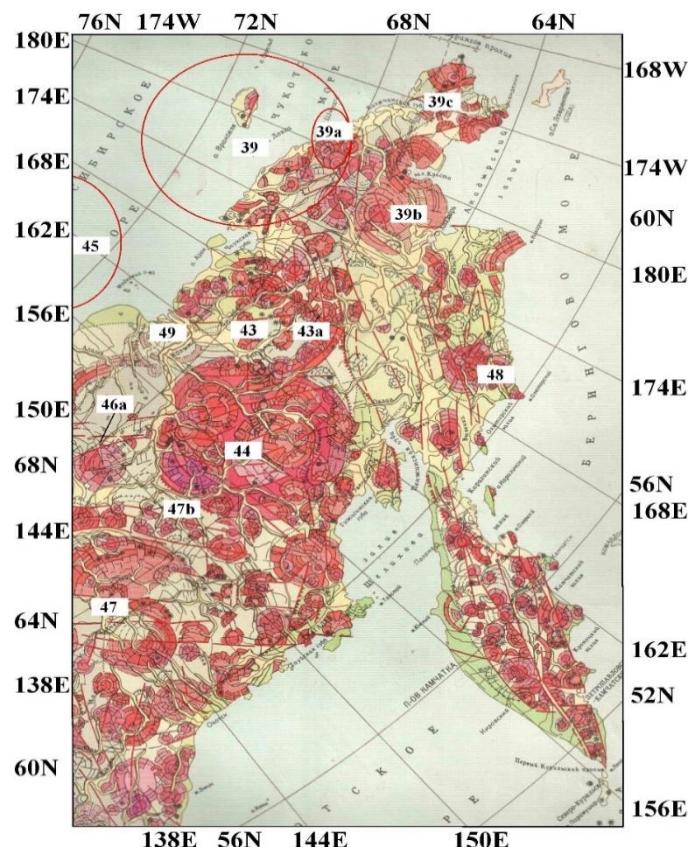


Рис. 3. Фрагмент карты морфологических структур центрального типа, расположенных на территории Восточной Сибири:

39 – Северо-Чукотская; 39a – Шмидтovskaya; 39b – Анадырская; 39c – Колючинская; 43 – Омоловская; 43a – Аонская; 44 – Среднеянская; 45 – Восточно-Сибирская; 46a – Алазейская; 47 – Устьнерская; 47b – Зыряновская; 48 – Олюторская; 49 – Нижне-Колымская⁸

Fig. 3. Fragment of a map of morphological structures of the central type located in Eastern Siberia:

39 – North Chukotka; 39a – Shmidtovskaya; 39b – Anadyr; 39c – Kolyuchinskaya; 43 – Omolonskaya; 43a – Aonian; 44 – Sredneyanskaya; 45 – East Siberian; 46a – Alazeyskaya; 47 – Ustnerskaya; 47b – Zyryanovskaya; 48 – Olyutorskaya; 49 – Nizhne-Kolymskaya⁸

⁸ Соловьев В. В. Структуры центрального типа территории СССР по данным геолого-геоморфологического анализа: объяснительная записка к Карте морфоструктур центрального типа территории СССР масштаба 1:10000000. Л.: Изд-во ВСЕГЕИ, 1978. 111 с.



Часть показанных на рис. 3 МСЦТ (39–49) имеет глубинные мантийные «корни». Анализ ранее рассмотренных многочисленных МСЦТ [1, 9] показывает, что наиболее крупные месторождения нефти обычно сосредоточены в периферических (бортовых) зонах, а месторождения газа – в пределах центральных купольных зон, расположенных над «трубами» дегазации мантии этих структур. Из анализа рис. 3 следует, что самые крупные газовые месторождения могут быть связаны с так называемыми «трубами» дегазации [9] (обычно расположенными в центральной части) основных МСЦТ (Баренцевоморской (35), Южно-Карской (36) и Печорской (37)), а нефтяные месторождения – с периферическими (бортовыми) зонами или периферическими дочерними МСЦТ (Шмидтовской (39а), Усть-Индигирской (45б), Островной (45с), Янской (45д), Алазейской (46а), Хатангской (11с)).

Другим подтверждением нефтегазовой перспективности территорий, связанных с МСЦТ Восточно-Сибирского региона, может быть один из глубинных геолого-геофизических разрезов, на котором можно видеть наличие Среднеянской куполообразной структуры, образованной осадочными породами этого нефтегазоносного бассейна, связанного с Среднеянским палеомантийным плюмом, расположенным в пределах Верхоянского региона (рис. 4).

Исследованиями установлено, что Среднеянская куполообразная МСЦТ (см. рис. 4) образована одноименным палеомантийным плюмом, подобным тем кольцевым морфологическим структурам, которые были выделены на территории Западной Сибири как наземным геолого-геофизическим (сейсморазведочным, гравитационным) данным [2, 9], так и с учетом данных дистанционного зондирования Земли⁹ [1].

Другой геолого-геофизический разрез, пересекающий территорию Олондинской МСЦТ, построенный по данным аномального магнитного поля (рис. 5, а), изображен на рис. 5, б.

На обоих геолого-геофизических разрезах (см. рис. 4 и 5) можно видеть наличие куполообразных (концентрических) МСЦТ, выделенных по дистанционным и геолого-геофизическим данным¹⁰, подобных другим концентрическим морфологическим структурам Арктики и Субарктики (например, Южно-Карской МСЦТ), в которых уже найдены многочисленные месторождения нефти и газа [9]. Опираясь на все вышеизложенные элементы методики регионального прогноза нефтегазовой перспективности регионов [9, 14, 19], на геоморфологические (см. рис. 4)¹¹ [1] и другие геолого-геофизические данные (см. рис. 5)¹² о расположении и глубинном строении МСЦТ Верхоянского региона, образованных одноименными палеомантийными плюмами, можно говорить о перспективности на нефть и газ их бортовых зон.

Важным статистическим параметром, по которому оценивают нефтегазоперспективность той или иной территории [22], является большое количество «сквозных» глубинных тектонических разломов, пересекающих всю земную кору, приходящихся на один квадратный километр исследуемого региона. Чтобы являться нефтегазоперспективными, тектонические разломы должны быть также перекрыты достаточно мощным слоем осадочных пород с глинистыми прослойками. Это необходимо для того, чтобы в результате дегазации мантии углеводородные геофлюиды, мигрирующие вверх по микро-поровому пространству вдоль глубинных тектонических разломов, задерживались в структурных и литологических «ловушках» осадочного слоя земной коры [14]. По спутниковым геомагнит-

⁹ Соловьев В. В. Структуры центрального типа территории СССР по данным геолого-геоморфологического анализа: объяснительная записка к Карте морфоструктур центрального типа территории СССР масштаба 1:10000000. Л.: Изд-во ВСЕГЕИ, 1978. 111 с.

¹⁰ Карта геотермического режима земной коры территории СССР. М-б 1:10000000 / сост. У. И. Моисеенко [и др.]; ред. А. А. Смыслов. М.: Аэрогеология, 1978. 1 л.

¹¹ Соловьев В. В. Структуры центрального типа территории СССР по данным геолого-геоморфологического анализа: объяснительная записка к Карте морфоструктур центрального типа территории СССР масштаба 1:10000000. Л.: Изд-во ВСЕГЕИ, 1978. 111 с.

¹² Карта геотермического режима земной коры территории СССР. М-б 1:10000000 / сост. У. И. Моисеенко [и др.]; ред. А. А. Смыслов. М.: Аэрогеология, 1978. 1 л.

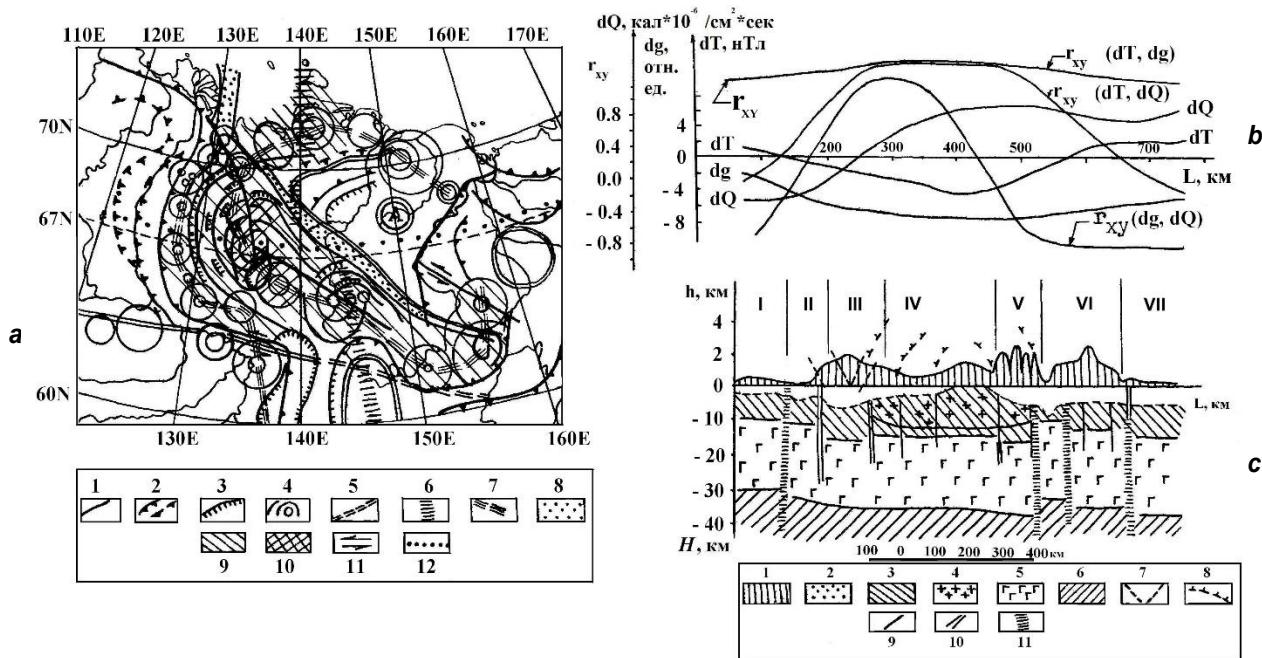


Рис. 4. Результаты анализа структурных формаций Верхоянского региона по данным дистанционного зондирования и наземным геолого-геофизическим данным:

а – структурная схема локализации магматических формаций Верхоянского региона:

1 – глубинные разломы коро-мантийного глубинного заложения; 2 – зоны коллизии между Сибирской платформой и Верхоянским геоблоком по геолого-геофизическим и дистанционным данным; 3 – надвиги и шарьяжи; 4 – морфологические структуры центрального типа; 5 – шовная зона, ограничивающая Колымский микроконтинент; 6 – трансрегиональные тектонические разломы сквозного типа; 7 – осевые зоны повышенной магматической проницаемости; 8 – рифтогенные неоген-четвертичные формации; 9 – область повышенных значений геотермического поля; 10 – область высоких значений геотермического поля, совпадающая с областью позднемезозойской гранитизации; 11 – тектонические разломы с бортовым смещением; 12 – положение профиля, вдоль которого построен схематический глубинный геолого-геофизический разрез; А – Алазейская морфологическая структура центрального типа, образовавшаяся на протяжении двух геодинамических режимов: инициального и островодужного

б – результаты корреляционного анализа данных измеренных геофизических полей:

dQ – график значений теплового потока вдоль профиля исследований; dg – график значений аномального гравитационного поля вдоль профиля исследований; dT – график значений модуля аномального магнитного поля вдоль профиля исследований; r_{xy} – коэффициент взаимной корреляции значений двух разных геофизических полей, рассчитанный вдоль профиля исследований

с – глубинный геолого-геофизический разрез земной коры, построенный по комплексу геолого-геофизических данных¹³ по исследуемому региональному профилю, пересекающему территорию Верхоянского региона вдоль 67-го градуса северной широты; геологические структуры, пересекаемые глубинным разрезом:

I – Сибирская платформа; II – Верхоянский прогиб; III – Верхоянское поднятие; IV – Среднеянский батолит;

V – поднятие Черского; VI – Момский рифт; VII – западный борт Омоловского массива;

1 – формации осадочного слоя земной коры; 2 – формации грубообломочных пород осадочного слоя земной коры; 3 – формационные комплексы байкалид; 4 – формационные комплексы байкалид с гранитизацией; 5 – формации «базальтового» слоя земной коры; 6 – слой консолидированной литосфера; 7 – нижняя граница осадочного слоя земной коры; 8 – направление пространственного простирания блоков гранитизированных комплексов земной коры; 9 – локальные внутрикоровые тектонические разломы; 10 – региональные внутрикоровые тектонические разломы; 11 – зоны повышенной проницаемости земной коры

Fig. 4. Analysis results of structural formations of the Verkhoyansk region according to remote sensing data and ground geological and geophysical data:

а – structural diagram of magmatic formation locations in the Verkhoyansk region:

1 – deep crustal-mantle faults; 2 – collision zones between the Siberian platform and the Verkhoyansk geoblock based on geological, geophysical and remote sensing data; 3 – thrusts and overthrust foldings; 4 – morphological structures of the central type; 5 – suture zone framing Kolyma microcontinent; 6 – trans-regional tectonic faults of the through type; 7 – axial zones of increased magmatic permeability; 8 – riftogenic Neogene-Quaternary formations;

¹³ Карта геотермического режима земной коры территории СССР. М-б 1:10000000 / сост. У. И. Моисеенко [и др.]; ред. А. А. Смыслов. М.: Аэрогеология, 1978. 1 л.



9 – area of increased values of the geothermal field; 10 – area of high values of the geothermal field coinciding with the area of late Mesozoic granitization; 11 – tectonic faults with a side shift; 12 – location of a profile along which a schematic deep geological and geophysical section is built; A – Alazeyskaya morphological structure of the central type formed during two geodynamic regimes: initial and island arc

b – correlation analysis results of the data of measured geophysical fields:

dQ – graph of heat flux values along the survey profile; dg – graph of the values of anomalous gravitational field along the survey profile; dT – graph of the modulus values of the anomalous magnetic field along the survey profile;

r_{xy} – cross-correlation coefficient of values of two different geophysical fields calculated along the survey profile

c – deep geological and geophysical section of the earth's crust built on the basis of integrated geological and geophysical data¹³ by the studied regional profile crossing the territory of the Verkhoyansk region along the 67th degree north latitude; geological structures intersected by a deep section:

I – Siberian platform; II – Verkhoyansk trough; III – Verkhoyansk uplift; IV – Sredneyansky batholith; V – Chersky uplift; VI – Momsky rift; VII – western side of the Omolonsky massif;

1 – formations of the sedimentary layer of the earth's crust; 2 – formations of coarse clastic rocks of the sedimentary layer of the earth's crust; 3 – Baikalid formation complexes; 4 – Baikalid formation complexes with granitization; 5 – formations of the "basalt" layer of the earth's crust; 6 – layer of the consolidated lithosphere; 7 – lower border of the sedimentary layer of the earth's crust; 8 – direction of spatial strike of granitized blocks of the earth's crust complexes; 9 – local intracrustal tectonic faults; 10 – regional intracrustal tectonic faults;

11 – zones of increased permeability of the earth's crust

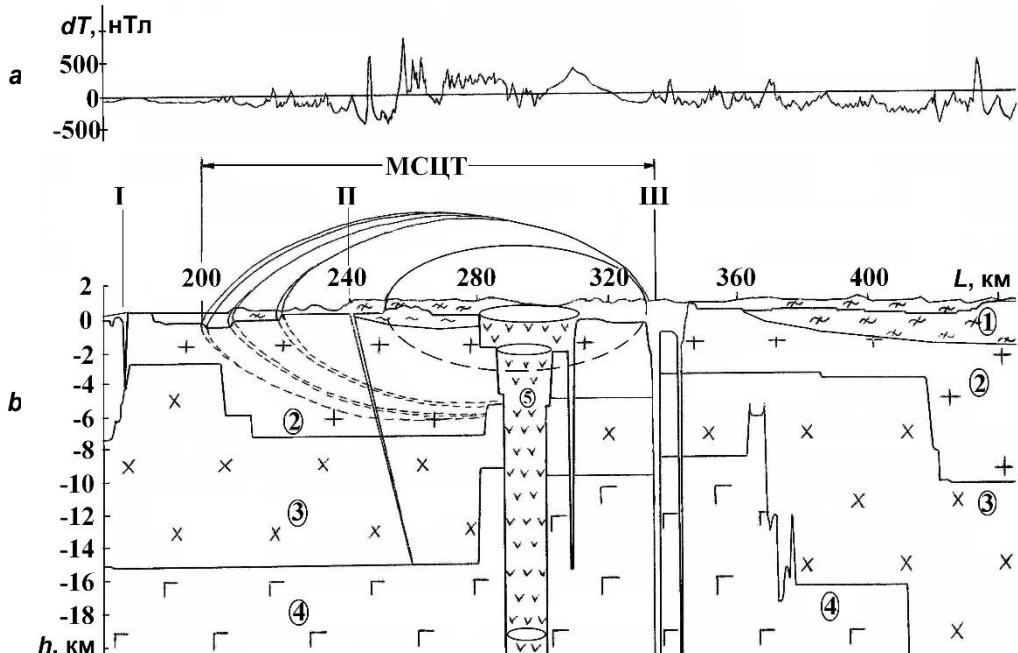


Рис. 5. Измеренное магнитное поле и геолого-геофизический (геомагнитный) разрез глубинного строения Олондинской куполообразной морфологической структуры центрального типа, сформированного одноименной концентрической палеомантийной плюм-тектонической структурой:

a – измеренные значения модуля dT аномального магнитного поля;

b – результаты расчета и построения глубинных границ геолого-геофизического (геомагнитного) разреза земной коры:

1 – слой грубообломочных формаций; 2 – формации грубообломочных пород осадочного слоя земной коры; 3 – слой гранитоидных формаций земной коры; 4 – формации «базальтового» слоя земной коры; I – Ченченский тектонический разлом; II – Верхнечарский тектонический разлом; III – Чароудинский тектонический разлом

Fig. 5. Measured magnetic field and geological and geophysical (geomagnetic) section of the deep structure of the Olondinsky dome-shaped morphological structure of the central type formed by the concentric paleomantle plume-tectonic structure of the same name:

a – measured values of the modulus dT of the anomalous magnetic field;

b – calculation and construction results of deep boundaries of geological and geophysical (geomagnetic) section of the earth's crust:

1 – a layer of coarse clastic formations; 2 – formations of coarse clastic rocks of the sedimentary layer of the earth's crust; 3 – layer of granitoid formations of the earth's crust; 4 – formations of the "basalt" layer of the earth's crust;

I – Chenchensky tectonic fault; II – Verkhnecharsky tectonic fault; III – Charoudinsky tectonic fault



ным и морфоструктурным данным было выделено около 30 крупных глубинных тектонических разломных зон в пределах акватории Северного Ледовитого океана. На рис. 6 показаны цепочки уже разведанных месторождений нефти и газа или разведанных, но пока не разбуренных перспективных нефтегазовых структур, которые самым непосредственным образом связаны с сетью ортогональных тектонических нарушений, выделенных по спутниковым геомагнитным и морфоструктурным

данным в пределах Баренцева, Печорского, Карского морей и полуострова Ямал. В пределах Южно-Карской, Баренцевоморской, Печорской МСЛТ особенно перспективны на нефть и газ антиклинальные литологические структуры (ловушки углеводородов), расположенные в узлах пересечений глубинных тектонических разломов, в зонах дробления пород с хорошими коллекторскими свойствами (см. рис. 6).

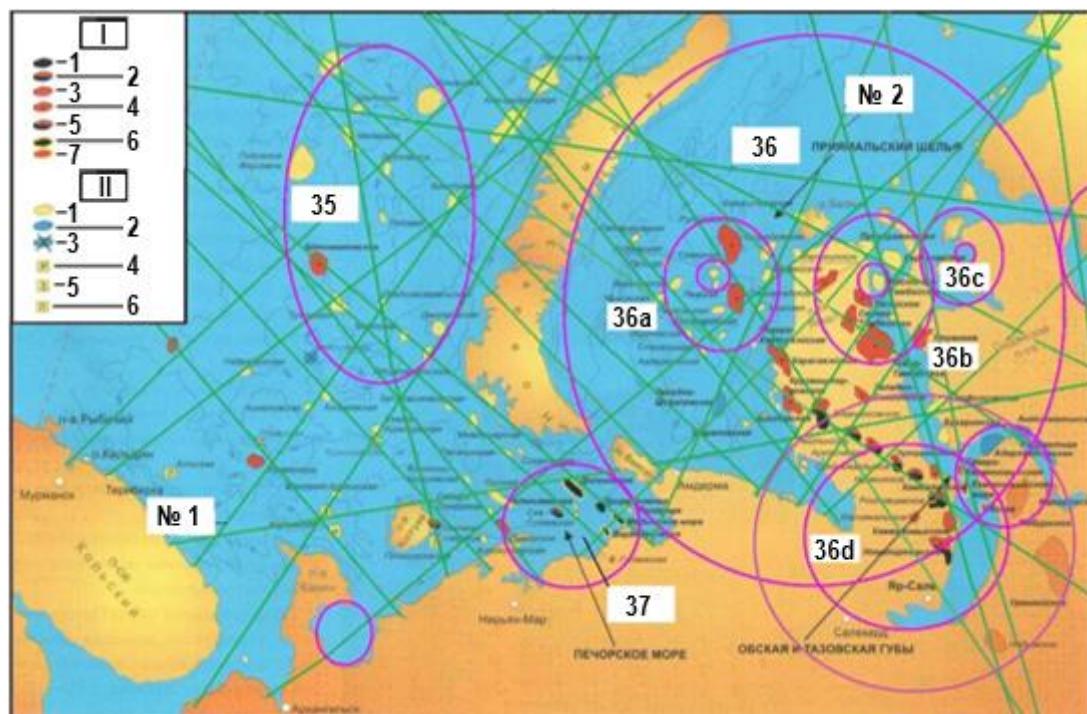


Рис. 6. Схема расположения взаимно ортогональной реологической сети тектонических разломов (пересекающиеся линии) и морфологических структур центрального типа (окружности) в пределах Карского, Баренцева, Печорского морей и связанных с ними месторождений углеводородов (красные – газовые месторождения, черные – нефтяные месторождения, желтые – выявленные структуры, голубые – подготовленные к бурению структуры):

I – месторождения: 1 – нефтегазовые; 2 – газонефтяные; 3 – газовые; 4 – газоконденсатные; 5 – нефтегазоконденсатные; 6 – открытые; 7 – ОАО «Газпром»

II – локальные структуры: 1 – выявленные; 2 – готовые к бурению; 3 – выведенные из бурения; 4 – аномалии типа «Риф»; 5 – аномалии типа «Залежь»; 6 – предполагаемые ловушки неантклинального типа
Некоторые наиболее известные тектонические разломы: № 1 – Кольский, № 2 – Обско-Ямальский
Нефтегазоперспективные морфологические структуры центрального типа: 35 – Баренцевоморская; 36 – Южно-Карская; 36a – Ленинградская; 36b – Ямальская; 36c – Гыданская; 36d – Обская; 37 – Печорская

Fig. 6. Location diagram of the mutually orthogonal rheological network of tectonic faults (intersecting lines) and morphological structures of the central type (circles) within the Kara, Barents, Pechora seas and associated with them hydrocarbon deposits (red – gas fields, black – oil fields, yellow – identified structures, blue – structures prepared for drilling):

I – fields: 1 – oil and gas; 2 – gas and oil; 3 – gas; 4 – gas condensate; 5 – oil and gas condensate; 6 – prospected; 7 – OJSC Gazprom

II – local structures: 1 – identified; 2 – ready for drilling; 3 – removed from drilling;

4 – Reef-type anomalies; 5 – Deposit-type anomalies; 6 – expected non-anticlinal traps

Some of the best known tectonic faults: No. 1 – Kola, No. 2 – Obsko-Yamalsky

Oil and gas promising morphological structures of the central type: 35 – Barents Sea; 36 – South Kara; 36a – Leningradskaya; 36b – Yamal; 36c – Gydanskaya; 36d – Obskaya; 37 – Pechora



Выделенные автором представленной статьи по спутниковым геомагнитным [19] и морфоструктурным данным (см. рис. 6) зоны структур центрального типа (окружности) (35, 36, 36a, 36b, 36c, 36d, 37), разбитых сетью глубинных тектонических разломов на акватории Северного Ледовитого океана (пересекающиеся линии), частично (35, 36s) представленные на рис. 7, также показывают, что они образуют вокруг себя достаточно перспективные (V, VIII, X) и высокоперспективные шельфовые области Арктики (II, IV) со значительными запасами углеводородов. Таким образом, независимые оценки ресурсов углеводородов, проведенные в пределах минимальной

площади внешней границы континентального шельфа, принятые Комиссией Организации Объединенных Наций (ООН) по границам континентального шельфа, свидетельствуют о перспективности значительной части шельфовых зон Российской Федерации вдоль побережья Северного Ледовитого океана. Сделанные нами оценки перспективных зон накопления углеводородов по комплексу различных геолого-геофизических, морфоструктурных данных о расположении МСЦТ совпадают с независимыми оценками ресурсов углеводородов Комиссии ООН в пределах внешней границы континентального шельфа Российской Федерации (см. рис. 7).

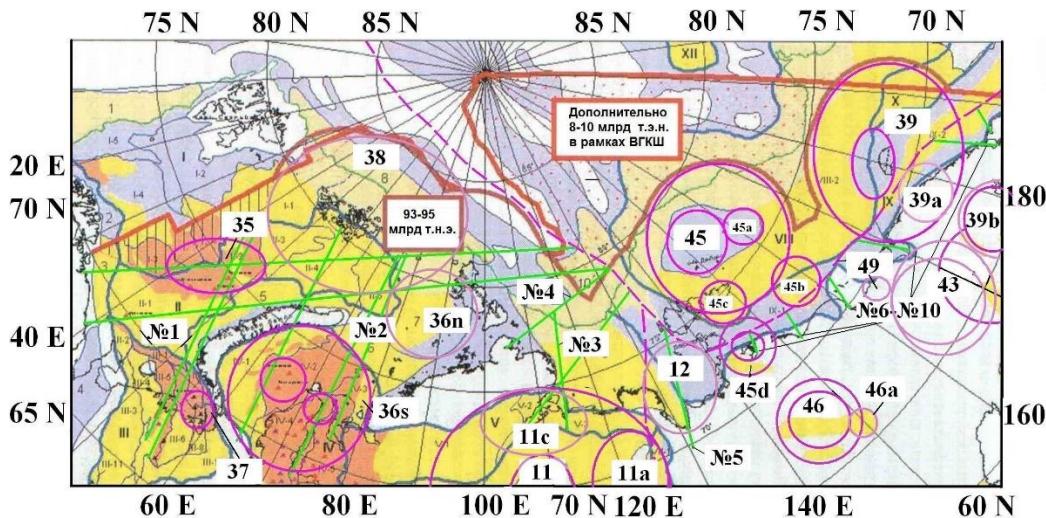


Рис. 7. Карта перспектив нефтегазоносности осадочных бассейнов Северного Ледовитого океана (с различными вариантами внешней границы континентального шельфа Российской Федерации)

Цветом обозначены площади с различной степенью перспективности концентрации углеводородов; в рамках дана оценка ресурсов углеводородов в пределах минимальной площади внешней границы континентального шельфа Российской Федерации, принимаемой Комиссией Организации Объединенных Наций по границам континентального шельфа¹⁴

Автором добавлены окружности, обозначающие расположение морфологических структур центрального типа. Пиловыми окружностями обозначены зоны расположения морфологических структур центрального типа (11, 11a, 11c, 12, 35–38, 39a, 39b, 43, 45a, 45b, 45c, 45d, 46, 49), сформированных палеомантийными плюмами. Оранжевым цветом выделены высокоперспективные зоны расположения месторождений углеводородов (I, II, III, IV), которые связаны с Баренцевской (35), Северо-Карской (36n), Южно-Карской (36s), Печорской (37), Франц-Иосифовской (38) морфологическими структурами центрального типа и с зонами дробления пород вдоль глубинных тектонических разломов: № 1 – Карельский, № 2 – Обско-Ямальский. В восточной части Арктики желтым цветом аналогично выделены средне-перспективные зоны расположения месторождений углеводородов (V, VIII, X), которые связаны с бортовыми зонами Индигиро-Колымской (46), Восточно-Сибирской (45), Омолонской (43), Северо-Чукотской (39), Лаптевской (12) морфологических структур центрального типа, их дочерними кольцевыми структурами (Оленёкской (11a), Хатангской (11c), Шмидтовской (39a), Анадырской (39b), Усть-Индигирской (45b), Островной (45c), Янской (45d), Алазейской (46c)) и с пересекающими их глубинными тектоническими разломами (№ 1 – Баренцевоморский, № 2 – Обские, № 3 – Хатангский, № 4 – Оленёкский, № 5 – Ленский, № 6 – Янский, № 7 – Индигирский, № 8 – Алазейский, № 9 – Колымский и другие тектонические разломы)

¹⁴ Глубинное строение Центрального Арктического бассейна: в связи с обоснованием внешней границы континентального шельфа Российской Федерации и оценкой углеводородных ресурсов: дис. ... д-ра геол.-минерал. наук: 25.00.10. СПб., 2009. 255 с.

**Fig. 7. Map of oil and gas potential of sedimentary basins of the Arctic Ocean****(with different options of the outer border of the continental shelf of the Russian Federation)**

The color indicates the areas with varying potential of hydrocarbon concentrations; the boxes contain the assessment of hydrocarbon resources within the minimum area of the outer border of the continental shelf of the Russian Federation adopted by the United Nations Commission on the boundaries of the continental shelf¹⁴

The author has added the circles that indicate the location of morphological structures of the central type. Lilac circles indicate location zones of morphological structures of the central type (11, 11a, 11c, 12, 35–38, 39a, 39b, 43, 45a, 45b, 45c, 45d, 46, 49) formed by paleomantle plumes. Orange color indicates highly promising location areas of hydrocarbon deposits (I, II, III, IV) associated with the Barents (35), North Kara (36n), South Kara (36s), Pechora (37), Franz Josef (38) morphological structures of the central type and with rock crushing zones along deep tectonic faults:

No. 1 – Karelsky, No. 2 – Obsko-Yamalsky. The yellow color in the eastern part of the Arctic similarly indicates mid-perspective location zones of hydrocarbon deposits (V, VIII, X), which are associated with the side zones of the Indigiro-Kolymskaya (46), East Siberian (45), Omolonskaya (43), North-Chukotka (39), Laptevskaya (12) morphological structures of the central type, their daughter ring structures (Olenekskaya (11a), Khatangskaya (11c), Schmidtovskaya (39a), Anadyr (39b), Ust-Indigirskaya (45b), Ostrovnoy (45c), Yanskaya (45d), Alazeyskaya (46c)) and with intersecting deep tectonic faults (No. 1 – Barents Sea, No. 2 – Obsky, No. 3 – Khatanga, No. 4 – Oleneksky, No. 5 – Lensky, No. 6 – Yansky, No. 7 – Indigirsky, No. 8 – Alazeysky, No. 9 – Kolymsky and other tectonic faults)

Заключение

На основе анализа представленных выше геолого-геофизических данных (морфоструктурных, магнитных, геотермических) можно заключить, что высоко перспективными регионами для поисков крупных нефтегазовых месторождений могут быть бортовые зоны МСЦТ и их дочерние периферийные структуры (см. рис. 7), расположенные в пределах восточной части Арктики (Восточно-Сибирское море (45b), (45c), (45d), Чукотское море (39)), а также в субарктической континентальной части Арктики, в различных районах Восточной Сибири (Анабарская (11)), Республики Саха (Якутия) (Индигиро-Колымская (46)) и Чукотского автономного округа (Анадырская (39b), Омоловская (43)), которые, в соответствии с представленными результатами [2, 9], связаны с палеомантийными плюмами. Независимые данные о ресурсах углеводородов, оцененных в пределах минимальной площади внешней границы континентального шельфа Российской Федерации, принятые Комиссией ООН по границам континентального шельфа (см. рис. 7), также показывают, что бортовые зоны МСЦТ в пределах Восточно-Сибирского и Чукотского морей являются достаточно перспективными на за-

леки нефти и газа (регионы выделены желтым цветом). Судя по сообщениям [9, 14, 16], углеводородные геофлюиды под действием высоких температур и давлений мигрируют к поверхностным структурным или литологическим «ловушкам» осадочного чехла по глубинным тектоническим разломам – зонам дробления и перетирания горных пород земной коры – и вследствие этого образуют зоны повышенной проницаемости. Часто эти тектонические разломы пересекают бортовые зоны глубинных морфологических структур или расположены вдоль них, поэтому здесь обычно сосредоточены месторождения углеводородов. На протяжении многих миллионов лет углеводороды концентрировались в различного вида структурных «ловушках» в приповерхностных слоях осадочного чехла, образуя значительные месторождения нефти и газа за периоды активной дегазации Земли [9, 14–16]. Эта точка зрения о миграции простейших углеводородов (C, CO₂, H₂, CH₄) из недр палеомантийных плюмов и их последующем геохимическом и термобарическом преобразовании [14] в более сложные углеводороды нефтяного ряда поддерживается многими известными российскими и зарубежными геологами и геофизиками [9, 16].

Список источников

1. Брюханов В. Н., Глуховский М. З., Ставцев А. Л. Кольцевые структуры Земли // Природа. 1977. № 10. С. 54–65.
2. Гаврилов С. В. Проникновение теплового диапира в континентальную литосферную плиту из ненью-
- тоновской верхней мантии // Физика Земли. 1994. № 7–8. С. 18–26.
3. Ротанова Н. М., Харитонов А. Л., Ченчанг Ан. Спектральный анализ магнитного поля, измеренного на спутнике МАГСАТ // Геомагнетизм и аэрономия. 1999.



Т. 39. № 3. С. 101–107.

4. Ротанова Н. М., Головков В. П., Фрунзе А. Х., Харитонов А. Л. Анализ спутниковых измерений с помощью разложения поля на естественные ортогональные составляющие // Геомагнетизм и аэрономия. 1999. Т. 39. № 4. С. 92–99.

5. Фонарев Г. А., Харитонов А. Л., Харитонова Г. П. Использование методов пространственно-временной магнитометрии для анализа магнитного поля, измеренного на спутнике «CHAMP» // Вестник Камчатской региональной организации «Учебно-научный центр». Серия: Науки о Земле. 2007. № 2. С. 49–53.

6. Lugovenko V. N., Pchelkin A. V., Kharitonov A. L. Nature of the magnetic anomaly field of continents and oceans // Proceedings of the International Conference on Marine Electromagnetics. London, 1997.

7. Xu Y., An Z., Huang B., Golovkov V. P., Rotanova N. M., Kharitonov A. L. Distribution of apparent magnetization for Asia // Science in China. Series D: Earth Sciences. 2000. Vol. 43. Iss. 6. P. 654–660. <https://doi.org/10.1007/BF02879510>.

8. Hassan G. S., Kharitonov A. L., Serkerov S. A. Principal satellite-measured three-dimensional statistical characteristics of potential fields in East Asia and their relationship to earthquake epicenters // Mapping Sciences and Remote Sensing. 2003. Vol. 39. Iss. 2. P. 105–117. <https://doi.org/10.2747/0749-3878.40.2.105>.

9. Валяев Б. М. Углеводородная дегазация Земли, геотектоника и происхождение нефти и газа // Дегазация Земли и генезис нефтегазовых месторождений (к 100-летию со дня рождения акад. П. Н. Кропоткина): сб. ст. / ред. А. Н. Дмитриевский, Б. М. Валяев. М.: ГЕОС, 2011. С. 10–32.

10. Визе В. Ю. История исследования советской Арктики: Баренцево и Карские моря. Архангельск: Севкрайгиз, 1935. 233 с.

11. Грамберг И. С., Сороков Д. С., Лазуркин Д. В. Задачи и направления региональных геолого-геофизических работ на нефть и газ в Арктической части Восточной Сибири // Геология нефти и газа. 1969. № 2. С. 27–31.

12. Яншин А. Л., Зятькова Л. К. Развитие и использование исследований природных явлений и ресурсов в Сибири и на Дальнем Востоке // Исследование Земли из космоса. 1980. № 1. С. 40–48.

13. Обручев С. В. Работа Колымского геоморфологического отряда Якутской экспедиции // Известия Академии наук СССР. Серия VII. Отделение физико-математических наук. 1929. № 8. С. 749–756.

14. Сейфуль-Мулюков Р. Б. Нефть и газ: глубинная природа и ее прикладное значение. М.: Торус Пресс, 2012. 216 с.

15. Сывороткин В. Л. Глубинная дегазация Земли и глобальные катастрофы: монография. М.: Геоинформцентр, 2002. 250 с.

16. Тимурзин А. И. Миф «энергетического голода» от Хаббера и пути воспроизведения ресурсной базы России на основе реализации проекта «Глубинная нефть» // Бурение и нефть. 2019. № 1. С. 12–20.

17. Трофимов И. Л., Шнеер В. С., Халезов А. А. Аномальное магнитное поле хребта Ломоносова по данным дрейфующей станции «Северный полюс-19» // Геомагнетизм и аэрономия. 2006. Т. 46. № 2. С. 275–279.

18. Langel R., Berbert J., Jennings T., Horner R. MAG-SAT data processing: a report for investigators. Greenbelt: Goddard Space Flight Center, 1981. 315 p. [Электронный ресурс]. URL: https://archive.org/details/nasa_tech-doc_19820017721/page/n1/mode/2up (17.08.2021).

19. Харитонов А. Л. Методы математической обработки первичных спутниковых данных, используемые для одновременного анализа электромагнитных неоднородностей в различных геосферах Земли // Современные проблемы дистанционного зондирования Земли из космоса: сб. тез. докл. XV Всерос. открыт. конф. М., 2017. С. 65.

20. Гаврилов С. В., Харитонов А. Л. Оценка скорости субдукции Русской платформы под Сибирскую в палеозое по распределению зон выноса мантийных углеводородов в Западной Сибири // Геофизические исследования. 2015. Т. 16. № 4. С. 36–40.

21. Новая глобальная тектоника (тектоника плит): сб. ст. / пер. с англ. К. Л. Волкович, Г. И. Денисова; ред. Л. П. Зоненшайн, А. А. Ковалев. М.: Мир, 1974. 471 с.

22. Закиров А. Ш., Харитонов А. Л. Глубинное строение и перспективы нефтегазоносности Северного Устюрта // Глубинная нефть. 2014. Т. 2. № 11. С. 1759–1771. [Электронный ресурс]. URL: http://journal.deepoil.ru/images/stories/docs/DO-2-11-2014/5_Zakirov-Kharitonov_2-11-2014.pdf (17.08.2021).

References

1. Bryukhanov V. N., Glukhovskii M. Z., Stavtsev A. L. Ring structures of the Earth. *Priroda*. 1977;10:54–65. (In Russ.).
2. Gavrilov S. V. Penetration of heat diapir in the continental lithosphere plate from the non-Newtonian upper mantle. *Fizika Zemli*. 1994;7-8:18–26. (In Russ.).
3. Rotanova N. M., Kharitonov A. L., Chang A. T. Spectral analysis of the magnetic field measured onboard the MAGSAT satellite. *Geomagnetism i aeronomiya*. 1999;39(3):101–107. (In Russ.).
4. Rotanova N. M., Golovkov V. P., Frunze A. Kh., Kharitonov A. L. An analysis of satellite measurements

using the expansion of the magnetic field into natural orthogonal components. *Geomagnetism i aeronomiya*. 1999;39(4):92–99. (In Russ.).

5. Fonarev G. A., Kharitonov A. L., Kharitonova G. P. Use of the spatial-temporary magnetic measurement methods for the analysis of the geomagnetic field, measured on the satellite «CHAMP». *Vestnik Kamchatskoy regional'noy assotsiatsii «Uchebno-nauchnyy tsentr»*. Серия: *Nauki o Zemle* = *Bulletin of Kamchatka Regional Association “Educational-Scientific Center”*. *Earth Sciences*. 2007;2:49–53. (In Russ.).



6. Lugovenko V. N., Pchelkin A. V., Kharitonov A. L. Nature of the magnetic anomaly field of continents and oceans. *Proceedings of the International Conference on Marine Electromagnetics*. London; 1997.
7. Xu Y., An Z., Huang B., Golovkov V. P., Rotanova N. M., Kharitonov A. L. Distribution of apparent magnetization for Asia. *Science in China. Series D: Earth Sciences*. 2000;43(6):654-660. <https://doi.org/10.1007/BF02879510>.
8. Hassan G. S., Kharitonov A. L., Serkerov S. A. Principal satellite-measured three-dimensional statistical characteristics of potential fields in East Asia and their relationship to earthquake epicenters. *Mapping Sciences and Remote Sensing*. 2003;39(2):105-117. <https://doi.org/10.2747/0749-3878.40.2.105>.
9. Valyaev B. M. Hydrocarbon degassing of the Earth, geotectonics and origin of gas and oil. In: Dmitrievskii A. N., Valyaev B. M. (eds.). *Degazatsiya Zemli i genezis neftegazovykh mestorozhdenii (k 100-letiyu so dnya rozhdeniya akademika P. N. Kropotkina)* = *Degassing of the Earth and genesis of oil and gas deposits (to the 100th birth anniversary of the Academician P. N. Kropotkin)*. Moscow: GEOS; 2011. p.10–32. (In Russ.).
10. Vize V. Yu. *History of Soviet Arctic exploration. The Barents and Kara seas*. Arkhangelsk: Sevkraigiz; 1935. 233 p. (In Russ.).
11. Gramberg I. S., Sorokov D. S., Lazurkin D. V. The tasks and directions of regional geological and geophysical works on oil and gas in the Arctic part of Eastern Siberia. *Geologiya nefti i gaza = Russian Oil and Gas Geology*. 1969;2:27-31. (In Russ.).
12. Yanshin A. L., Zyat'kova L. K. Development and use of studies of natural phenomena and resources in Siberia and the Far East. *Issledovanie Zemli iz kosmosa*. 1980;1:40-48. (In Russ.).
13. Obruchev S. V. The work of the Kolyma geomorphological party of the Yakutsk expedition. *Izvestiya Akademii nauk SSSR. Seriya VII. Otdelenie fiziko-matematicheskikh nauk*. 1929;8:749-756. (In Russ.).
14. Seiful'-Mulyukov R. B. *Oil and gas: inorganic abiotic nature and its applicability*. Moscow: Torus Press; 2012. 216 p. (In Russ.).
15. Syvorotkin V. L. *Deep degassing of the Earth and global natural disasters*. Moscow: Geoinformtsentr; 2002. 250 p. (In Russ.).
16. Timurzhev A. I. Myth of "Power hunger" from Habbert and ways of the decision of the global power problem on base of "Deepoil" project realization. *Burenie i neft'*. 2019;1:12-20. (In Russ.).
17. Trofimov I. L., Shneer V. S., Khalezov A. A. Anomalous magnetic field of the Lomonosov Rise according to data of the North Pole 19 drifting station. *Geomagnetizm i aeronomiya*. 2006;46(2):275-279. (In Russ.).
18. Langel R., Berbert J., Jennings T., Horner R. MAG-SAT data processing: a report for investigators. Greenbelt: Goddard Space Flight Center; 1981. 315 p. Available from: https://archive.org/details/nasa_techdoc_19820017721/page/n1/mode/2up [Accessed 17th August 2021].
19. Kharitonov A. L. Mathematical methods of primary satellite data processing used for simultaneous analysis of electromagnetic heterogeneities in different geospheres of the Earth. In: *Sovremennye problemy distantsionnogo zondirovaniya Zemli iz kosmosa: sbornik tezisov dokladov XV Vserossiiskoi otkrytoi konferentsii = Modern problems of Earth remote sensing: collected abstracts of reports of 15th All-Russian open conference*. Moscow, 2017. p.65. (In Russ.).
20. Gavrilov S. V., Kharitonov A. L. Velocity of the subduction of the Russian platform under the Siberian one in the Paleozoic by the distribution of mantle hydro-carbon upwelling zones in Western Siberia. *Geofizicheskie issledovaniya*. 2015;16(4):36-40. (In Russ.).
21. Zonenshain L. P., Kovalev A. A. *The new global tectonics (plate tectonic)*. Moscow: Mir; 1974. 471 p. (In Russ.).
22. Zakirov A. Sh., Kharitonov A. L. Deep structure and prospects of oil-and-gas content of Northern Ustyurt. *Glubinnaya neft'*. 2014;2(11):1759-1771. Available from: http://journal.deepoil.ru/images/stories/docs/DO-2-11-2014/5_Zakirov-Kharitonov_2-11-2014.pdf [Accessed 17th August 2021]. (In Russ.).

Информация об авторе / Information about the author



Харитонов Андрей Леонидович,
кандидат физико-математических наук,
ведущий научный сотрудник Лаборатории главного магнитного поля,
Институт земного магнетизма, ионосфера и распространения радиоволн
им. Н. В. Пушкова РАН,
г. Москва, Россия,
ahariton@izmiran.ru,
<https://orcid.org/0000-0002-0843-452X>.

Andrey L. Kharitonov,
Cand. Sci. (Phys. & Math.),
Leading Researcher of the Main Magnetic Field Laboratory,
Pushkov Institute of Terrestrial Magnetism, Ionosphere and Radio Wave Propagation,
Russian Academy of Sciences,
Moscow, Russia,
ahariton@izmiran.ru,
<https://orcid.org/0000-0002-0843-452X>.

**Вклад автора / Contribution of the author**

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

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

Конфликт интересов / Conflict of interests

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

Автор прочитал и одобрил окончательный вариант рукописи.
The final manuscript has been read and approved by the author.

Информация о статье / Information about the article

Статья поступила в редакцию 02.09.2021; одобрена после рецензирования 07.10.2021; принята к публикации 09.11.2021.

The article was submitted 02.09.2021; approved after reviewing 07.10.2021; accepted for publication 09.11.2021.



GEOINFORMATICS

Original article

<https://doi.org/10.21285/2686-9993-2021-44-4-397-407>



Simulation of tectonic stress field and prediction of fracture distribution in shale reservoir*

Wenlong Ding^a, Weite Zeng^b, Ruyue Wang^c, Kai Jiu^d, Zhe Wang^e, Yaxiong Sun^f, Xinghua Wang^g

^{a,c,f,g}China University of Geosciences, Beijing, China

^bHainan Geological Survey, Haikou, China

^dBeijing Jingneng Petroleum Corporation Limited, Beijing, China

^eShandong Kerui Group Holding Corporation Limited, Dongying, China

Corresponding author: Wenlong Ding, dingwenong2006@126.com

Abstract. In this paper, a finite element-based fracture prediction method for shale reservoirs was proposed using geo-stress field simulations, uniaxial and triaxial compression deformation tests, and acoustic emission geostress tests. Given the characteristics of tensile and shear fractures mainly developed in organic-rich shales, Griffith and Coulomb – Mohr criteria were used to calculate shale reservoirs' tensile and shear fracture rates. Furthermore, the total fracture rate of shale reservoirs was calculated based on the ratio of tension and shear fractures to the total number of fractures. This method has been effectively applied in predicting fracture distribution in the Lower Silurian Longmaxi Formation shale reservoir in southeastern Chongqing, China. This method provides a new way for shale gas sweet spot optimization. The simulation results have a significant reference value for the design of shale gas horizontal wells and fracturing reconstruction programs.

Keywords: southeastern Chongqing, Longmaxi Formation, shale reservoir, simulation of tectonic stress field, fracture prediction

Funding: this research was supported by the National Natural Science Foundation of China (grant no. 42072173).

For citation: Ding Wenlong, Zeng Weite, Wang Ruyue, Jiu Kai, Wang Zhe, Sun Yaxiong, Wang Xinghua. Simulation of tectonic stress field and prediction of fracture distribution in shale reservoir. *Nauki o Zemle i nedropol'zovanie = Earth sciences and subsoil use*. 2021;44(4):397-407. <https://doi.org/10.21285/2686-9993-2021-44-4-397-407>.

ГЕОИНФОРМАТИКА

Научная статья

УДК 551.243+004.94

Моделирование поля тектонических напряжений и прогноз распределения трещин в сланцевом коллекторе*

Вэнълун Дин^a, Вэйтэ Цзэн^b, Жуюэ Ван^c, Кай Цзю^d, Чжэ Ван^e, Ясюн Сунь^f, Синхуа Ван^g

^{a,c,f,g}Китайский университет геологических наук, г. Пекин, Китай

^bГеологическая служба Хайнаня, г. Хайкоу, Китай

^dПекинская нефтепромысловая корпорация Цзиннэн, г. Пекин, Китай

^eШаньдун Кэжуй Групп Холдинг Лимитед, г. Дунъин, Китай

Автор, ответственный за переписку: Дин Вэнълун, dingwenong2006@126.com

Резюме. Статья представляет способ прогнозирования трещиноватости сланцевых коллекторов, основанный на методе конечных элементов с использованием моделирования поля напряжений, деформационных тестов на одноосное и трехосное сжатие, а также испытаний акустической эмиссии на сжатие. Учитывая характеристики трещин при растяжении и сдвиге, которые в основном возникают в сланцах, богатых органическими веществами, были использованы критерии Гриффита и Кулона – Мора для расчета скоростей роста трещин при растяжении и сдвиге в сланцевых коллекторах. Кроме того, общая скорость роста трещин в сланцевых коллекторах была рассчитана

© Ding Wenlong, Zeng Weite, Wang Ruyue, Jiu Kai, Wang Zhe, Sun Yaxiong, Wang Xinghua, 2021

*The article was provided by the Earth Science Frontiers journal within the framework of the agreement between the editorial boards of Irkutsk National Research Technical University (Irkutsk, Russia) and China University of Geosciences (Beijing, China) on the exchange of open access scientific papers.

*Статья была предоставлена редакцией журнала Earth Science Frontiers в рамках соглашения между редакциями Иркутского национального исследовательского технического университета (г. Иркутск, Россия) и Китайского университета геологических наук (г. Пекин, Китай) об обмене научными статьями открытого доступа.



на основе отношения трещин растяжения и сдвига к общему количеству трещин. Этот метод был эффективно применен для прогнозирования распределения трещин в сланцевом коллекторе формации Лунмаси нижнего си-лура на юго-востоке Чунцина, Китай, и он обеспечивает новый способ оптимизации перспективных месторождений сланцевого газа. Результаты моделирования имеют важное значение для проектирования горизонтальных скважин для добычи сланцевого газа и создания программ по реконструкции гидроразрыва пласта.

Ключевые слова: юго-восточный Чунцин, формация Лунмаси, сланцевый пласт, моделирование поля тектонических напряжений, прогноз разрушения

Финансирование: исследование было проведено при поддержке Национального фонда естественных наук Китая (грант № 42072173).

Для цитирования: Дин Вэнълун, Цзэн Вэйтэ, Ван Жуюэ, Цзю Кай, Ван Чжэ, Сунь Ясюн, Ван Синхуа. Моделирование поля тектонических напряжений и прогноз распределения трещин в сланцевом коллекторе // Науки о Земле и недропользование. 2021. Т. 44. № 4. С. 397–407. <https://doi.org/10.21285/2686-9993-2021-44-4-397-407>.

Introduction

For low-porosity and low-permeability shale reservoirs, the nano-scale pores in the matrix have basically no seepage capability. Therefore, fractures not only provide important space for hydrocarbon storage, but also provide efficient channels for hydrocarbon migration [1–3]. The great success of the marine organic-rich shale gas industry in North America shows that natural fractures can promote the large-scale accumulation of hydrocarbons in shale reservoirs [4–6]. Fractures are a key factor in obtaining high yields in shale reservoirs [7–12]. A large number of oil-field data around the world show that the degree of fracture development in tight reservoirs is closely related to productivity [13–16]. For example, the degree of fracture development of Paleozoic marine shale in North America is positively correlated with total gas content and free gas content. The success rate of shale gas exploration in the fractured zone is high. In addition, the natural gas productivity in the organic-rich marine shale reservoirs of the Lower Paleozoic in the Sichuan Basin of China is also positively correlated with the degree of fracture development [17–19].

In this paper, a finite element-based fracture prediction method for shale reservoirs was proposed using geostress field simulations, uniaxial and triaxial compression deformation tests, and acoustic emission geostress tests. This technology has achieved good application effects in the prediction of fracture distribution in the Lower Silurian Longmaxi Formation shale reservoir in southeastern Chongqing, China. Moreover, it provides a new way for shale gas sweet spot optimization, and the simulation results have important reference value for the design of shale gas horizontal wells and fracturing reconstruction programs.

Materials and methods

Experiments. In this paper, acoustic emissions and rock mechanics experimental tests were used to obtain the rock mechanical properties and paleostress of the target shale. The tests were completed in the Beijing SGS Rock Physics Laboratory. A GCTS petrophysical testing system was used for rock mechanics testing. The pressure sensor error of this instrument was less than 1 %, the displacement sensor ranges were between ± 50 mm, and the strain accuracy was 0.0001 mm. In addition, the acoustic emission instrument was the SAMOSTM acoustic emission detection system. Its core component is the PCI-8 acoustic emission function card that processes the PCI bus in parallel. It has 8 channels of real-time acoustic emission feature extraction, waveform acquisition and processing capabilities on one board. Modern digital signal processing technology (DSP) is adopted, which is currently the most advanced acoustic emission processing system in the world.

Finite element model. This paper used the finite element method to simulate the tectonic stress field and then predicted the plane distribution of tectonic fractures based on rupture principles. The core technology of this method is to establish an accurate geological model, mechanical model, and calculation model of the simulated area. The measured rock mechanical property parameters and paleostress values were used to calibrate the fake stress field (Fig. 1). The organic-rich shale mainly develops tensile and shear fractures. Therefore, Griffith and Coulomb – Mohr failure criteria were used to calculate the tensile and shear failure rate, respectively. Finally, proposed the comprehensive rupture rate based on the coupling results of tensile and shear ruptures (Fig. 1).

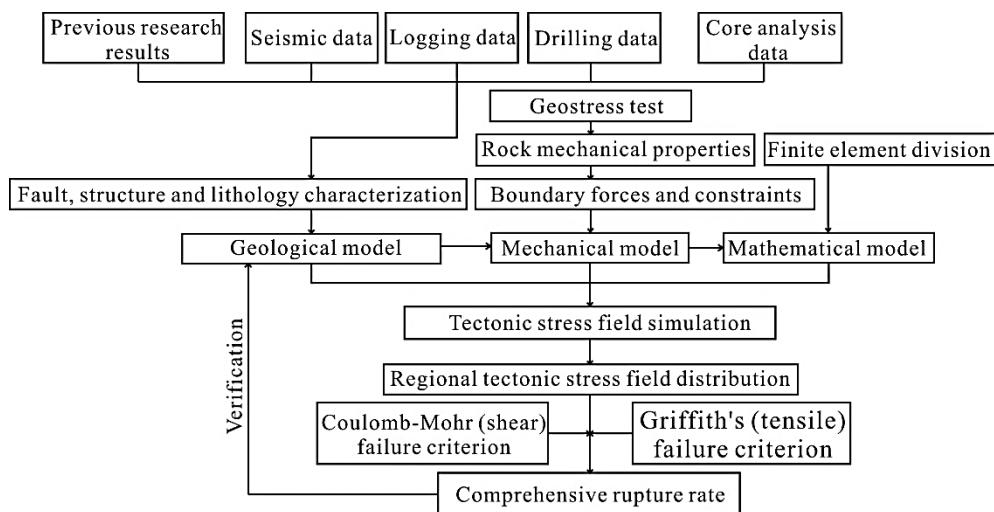


Fig. 1. Work flow of shale fracture prediction based on finite element method
Рис. 1. Последовательность операций по прогнозированию трещиноватости сланцев на основе метода конечных элементов

The geological model of the southeast area of Chongqing is triangularly gridded, which includes 9,965 nodes and 19,670 grid cells (Fig. 2).

$$[f]^e = \begin{bmatrix} u \\ v \end{bmatrix} = \begin{bmatrix} N_i u_i + N_j u_j + N_m u_m \\ N_i v_i + N_j v_j + N_m v_m \end{bmatrix} = \begin{bmatrix} N_i & 0 & N_j \\ 0 & N_i & 0 \\ N_j & 0 & N_m \end{bmatrix} \begin{bmatrix} u_i & v_i & u_j & v_j & u_m & v_m \end{bmatrix}^T. \quad (1)$$

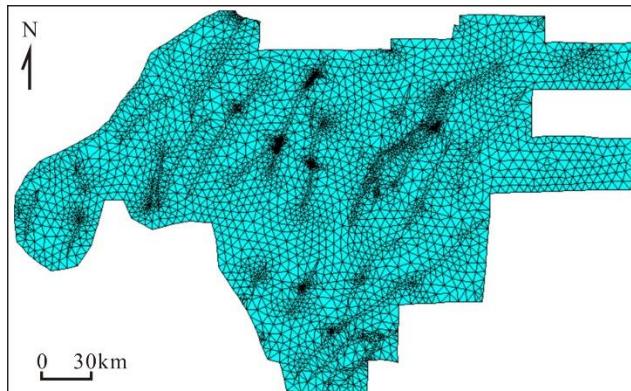


Fig. 2. Grid model of Longmaxi Formation shale in southeastern Chongqing area
Рис. 2. Сеточная модель сланцев формации Лунмаси в юго-восточной части района Чунцин

Equation (1) can be simplified as:

$$[f] = [N][\delta]^e. \quad (2)$$

In the formula, N_i , N_j and N_m are the morphological function or shape function of the element displacement, $[N]$ is the shape function matrix, and $[\delta]^e$ is the nodal displacement component matrix.

The strain of the element is a geometric equation:

$$[\varepsilon] = \begin{bmatrix} \varepsilon_x \\ \varepsilon_y \\ \varepsilon_{xy} \end{bmatrix} = \begin{bmatrix} \frac{\partial}{\partial x} & 0 \\ 0 & \frac{\partial}{\partial y} \\ \frac{\partial}{\partial y} & \frac{\partial}{\partial x} \end{bmatrix} \begin{bmatrix} u \\ v \end{bmatrix}. \quad (3)$$

For any triangle mesh element, the displacement u , v of any point (x, y) in the component can be expressed as a matrix form:

$$[u] = \begin{bmatrix} u_i & v_i & u_j & v_j & u_m & v_m \end{bmatrix}^T. \quad (4)$$

When equation (1) is substituted into equation (3), the strain matrix of the element can be obtained:

$$[\varepsilon] = [B][\delta]^e. \quad (5)$$

In the formula, the conversion matrix $[B]$ is a geometric matrix.

For each element, the maximum principal stress is obtained through coordinate transformation:

$$\begin{vmatrix} \sigma_x - \sigma & \tau_{yx} \\ \tau_{yx} & \sigma_y - \sigma \end{vmatrix} = 0. \quad (6)$$

The maximum principal stress σ_1 and the minimum principal stress σ_3 can be obtained by solving the above formula.



Griffith and Coulomb – Mohr criterions. Under the action of regional tectonic stress, there are two main types of ruptures inside the rock: tensile and shear fractures [8–9].

Shear rupture follows the Coulomb – Mohr criterion, and tensile fracture follows the Griffith criterion [19–21].

The expression of the plane rupture criterion of Griffith theory is:

When $\sigma_1 + 3\sigma_3 \geq 0$, the rupture criterion is:

$$(\sigma_1 - \sigma_3)^2 - 8(\sigma_1 + \sigma_3)\sigma_T = 0. \quad (6)$$

When $\sigma_1 + 3\sigma_3 < 0$, the rupture criterion is:

$$\sigma_3 + \sigma_T = 0. \quad (7)$$

In the formula, σ_1 is the maximum principal stress, MPa; σ_3 is the minimum principal stress, MPa, and σ_T is the tensile stress of the rock, MPa.

The Coulomb – Mohr criterion believes that the shear failure on a plane is related to the combination of the normal stress σ and the shear stress τ . The Coulomb – Mohr shear rupture criterion can be expressed as:

$$|\tau| = C + \sigma \tan \varphi. \quad (8)$$

In the formula, $|\tau|$ is the shear strength of the rock, MPa; σ is the normal stress, MPa; C is the cohesive force, MPa; φ is the internal friction angle, $^\circ$; $\tan \varphi$ is the internal friction coefficient.

Comprehensive rupture rate. In this paper, the tensile rupture rate I_t and the shear rupture rate I_n were introduced to characterize different types of fractures:

$$I_t = \sigma_T / \sigma_t. \quad (9)$$

In the formula, σ_T is the effective tensile stress, MPa; σ_t is the tensile strength of the rock, MPa. When $I_t \geq 1$, tensile ruptures will occur.

$$I_n = \tau_n / |\tau|. \quad (10)$$

In the formula, τ_n is the effective shear stress, MPa, and $|\tau|$ is the shear strength of the rock, MPa. When $I_n \geq 1$, shear ruptures will occur.

The rupture mode of shale is a comprehensive reflection of tensile and shear stresses [9–10]. Therefore, in order to better quantitatively characterize the development degree of structural fractures in shale reservoirs, a comprehensive fracture coefficient was proposed.

$$I_z = (aI_t + bI_n)/2. \quad (11)$$

In the formula, a and b are the ratios of tensile and shear fractures respectively. In this paper, $a : b = 3 : 2$. Similarly, when $I_z \geq 1$, the rock reaches a fractured state, and the higher the comprehensive fracture rate value of shale, the greater the fractured degree.

Results

Palaeo-stress based on acoustic emission. In the simulation of in-situ stress, the assignment of reasonable rock mechanics parameter attributes of the geological model of the target layer is essential. Furthermore, the assigned geological model is converted to a mechanical model. According to regional tectonic movement and acoustic emission tests, it is believed that during the Yanshan period, the tectonic activity in southeastern Chongqing was the strongest (148.8 MPa maximum tectonic stress); followed by the Himalayan movement (122.5 MPa maximum tectonic stress) (Table 1).

Rock mechanics parameters. The faults in the study area were divided into first-order, second-order, and third-order faults. At the same time, the fold areas were split into slot folds, battlement folds, and barrier folds. The rock mechanics test results of different types of shales in the Longmaxi Formation in the study area are shown in Table 2.

Mechanical properties of fault and fold zones. The fault zone was defined as a "weak zone" whose elastic modulus was 50–70 % of the ordinary sedimentary strata. At the same time, the Poisson's ratio was more extensive than that of the ordinary sedimentary strata, and the differences between them were between 0.02 and 0.1. The folding zone was identified as a "tough zone", and its elastic modulus was 1.5 to 3 times that of the normal sedimentary formation. At the same time, the Poisson's ratio was smaller than the normal sedimentary formation, and the differences between them were between 0.01 and 0.15 (Table 3).

Table 1. Measurement results of acoustic emission stress of Longmaxi Formation in Well Y1
Таблица 1. Результаты измерения напряжения акустической эмиссии формации Лунмаси в скважине Y1

Well	Depth, m	Formation	Effective value of σ_1 , MPa	Number of tectonic activities
Y1 well	0~325.5	Longmaxi Formation	23.1, 40.8, 57.4, 91, 122.5, 148.8	6



Table 2. Rock mechanics test results of different types of shales in the Longmaxi Formation in the study area

Таблица 2. Результаты испытаний механики горных пород различных типов сланцев в формации Лунмаси в районе исследования

Lithology	Density ρ_0 , g·cm ⁻³	Tensile strength σ_t , MPa	Compressive strength σ_c , MPa	Elastic modulus E , GPa	Poisson's ratio μ	Cohesion C , MPa	Internal friction angle φ , °
Black shale	2.715	16.67	100.95	52.83	0.266	22.33	34.53
Dark gray shale	2.657	5.95	149.6	59.75	0.255	27.71	34.56
Argillaceous siltstone	2.688	12.23	102.75	65.82	0.286	3.84	56.36
Calcareous shale	2.655	6.79	132.87	42.87	0.205	16.42	49.01
Siliceous shale	2.747	9.06	101.83	54.06	0.261	12.42	58.11

Table 3. Assignment of rock mechanics parameters in the fault and fold zones in the study area

Таблица 3. Определение параметров механики горных пород в разломной и складчатой зонах исследуемой территории

Geological unit type		Elastic modulus, MPa	Poisson's ratio
Fault zone	First-order fault	21,435	0.332
	Second-order fault	32,436	0.317
	Third-order fault	36,981	0.305
Fold zone	Slotted fold	102,180–137,460	0.2–0.211
	Battlement fold	85,660–102,180	0.211–0.248
	Barrier fold	65,740–85,660	0.248–0.256

Discussion

Tectonic stress field distribution. It can be seen from the simulation results of the tectonic stress field (Fig. 3) that the maximum principal stresses of the Longmaxi Formation shale reservoir in southeastern Chongqing were concentrated between -217.404 and -4.109 MPa. Positive values were defined as tensile stress, and negative values were defined as compressive stress. The maximum principal stress inside the

fault zone was lower than that of ordinary sedimentary strata, and the stress intensity values were mainly distributed between -46.768 and -4.19 MPa. For areas with underdeveloped faults, the maximum principal stress value distribution ranged from -103.647 to -46.768 MPa.

The rocks inside the fold zone are severely deformed, especially the rocks at the shaft and turning ends of the folds are more severely deformed. The stress in these structural parts will

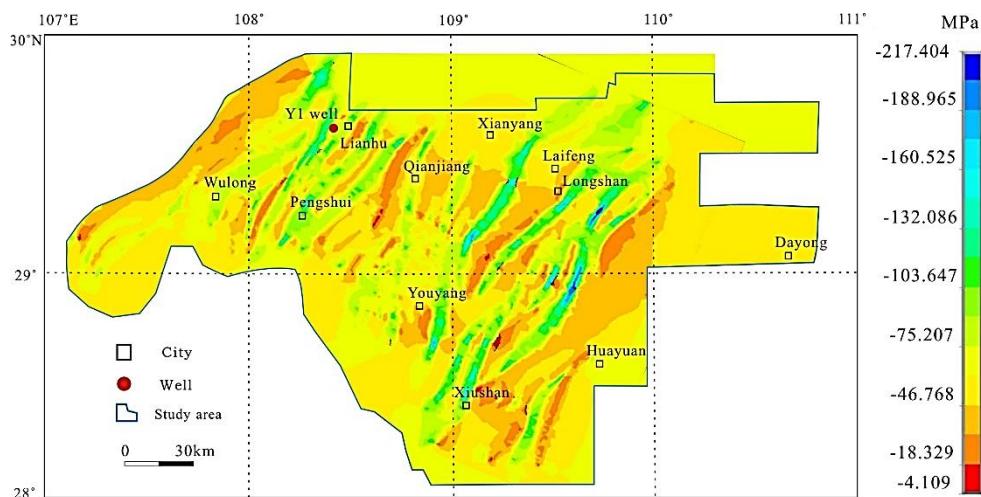


Fig. 3. Distribution of maximum principal stress of Longmaxi Formation shale in southeastern Chongqing area

Рис. 3. Распределение максимумов основных нормальных напряжений в сланцах формации Лунмаси в юго-восточной части района Чунцин



be highly concentrated under the premise that there is no fault damage and cannot release the stress. Suppose the fold is clamped by reverse faults, such as the southwestern Huayuan and Pengshui west-trending fault fold belt, or the fault-related folds adjacent to the fault, such as Longshan and Xiushan areas. In that case, the maximum principal stress value will be higher. In addition, the closer the fold is to the fault, the more obvious the stress gradient changes. In addition to the fold mentioned above belts, the fault belt's end and the fault's turning end are also the transition areas from the broken rocks inside the fault belt to continuous strata. The rocks in these areas are at the edge of ruptures. Therefore, the stress value is higher. The maximum principal stress distribution in these areas ranges from -217.404 to -103.647 MPa.

The shear stresses of the target shale reservoir in the study area ranged from -4.707 to 49.222 MPa (Fig. 4). Among them, positive values were defined as left-handed and defined negative values as right-handed. The structures of the study area showed obvious strike-slip characteristics, and the NNE-trending "S"-shaped faults and folds had the attributes of counter-clockwise rotation and twisting. It can be seen from

Figure 4 that the shear stress value in the study area is mainly positive, reflecting the counter-clockwise left-handed shear stress field in the Himalayan period in southeast Chongqing. The simulation results are consistent with the compression-torsional strike-slip structural deformation characteristics shown in the Himalayan period in the study area.

Prediction of fracture distribution. In this paper, the degrees of fracture development in shale reservoirs were divided into five levels (Table 4).

According to Figure 5, there are widely distributed fractures of grade I–IV in the eastern part of the study area, and the fracture development coefficients are mainly 1.4–4. Among them, the sizeable trough-shaped fold axis in the northern part of Huayuan is an area with highly developed fractures (level IV), and the fracture development coefficient has even reached above 4 (the formation was severely broken). The southern (Xiushan, south of Huayuan) and northwestern (Lianhu area) areas are favorable areas for level II and level I fractures, respectively. The western part (Wulong, Pengshui) mainly develops first-level fractures, and the fracture development coefficients are between 1–1.4.

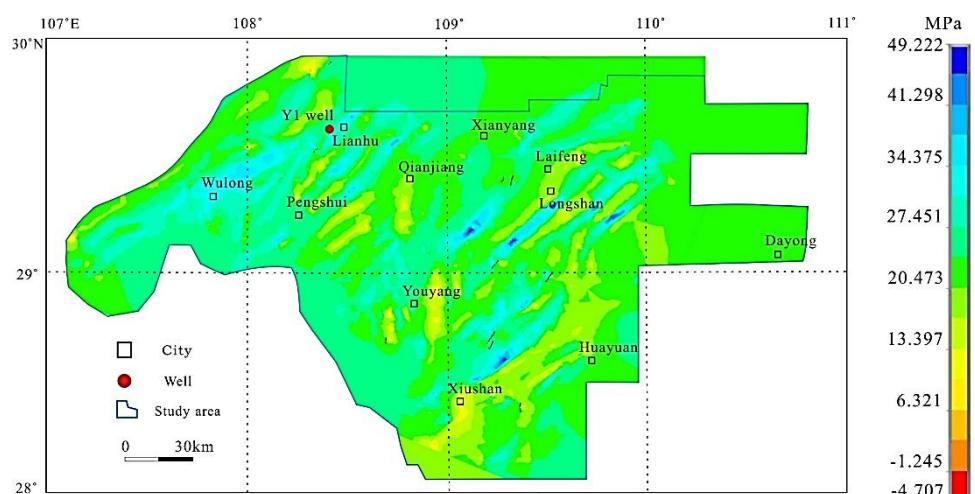


Fig. 4 Distribution of shear stress of Longmaxi Formation shale in southeastern Chongqing area
Рис. 4. Распределение напряжений сдвига в сланцах формации Лунмаси в юго-восточной части района Чунцин

Table 4. Criteria for the development of fractures in shale reservoirs
Таблица 4. Критерии развития трещин в сланцевых коллекторах

Fracture development	X	I	II	III	IV
I_z	$I_z < 1$	$1 \leq I_z < 2$	$2 \leq I_z < 3$	$3 \leq I_z < 4$	$I_z \geq 4$
Fracture description	Undeveloped	Relatively developed	Developed	Well developed	Extremely developed

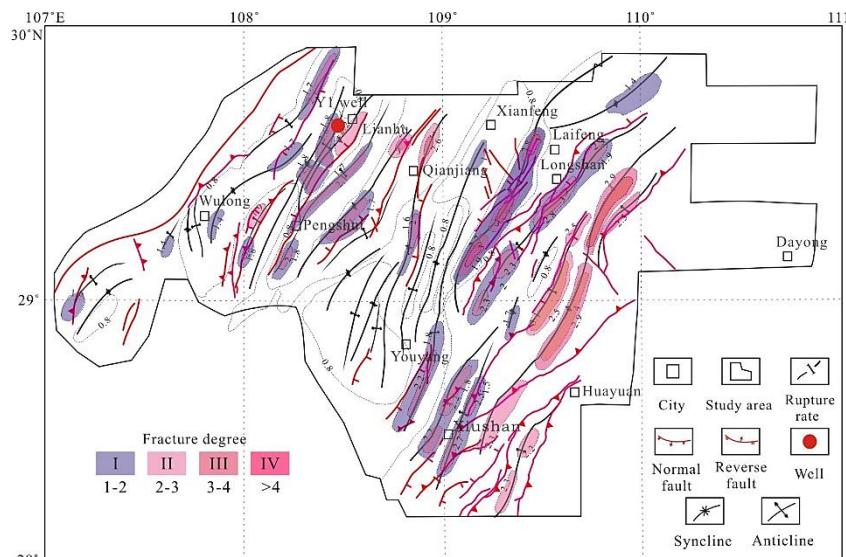


Fig. 5. Distribution of fracture development coefficient in Longmaxi Formation shale in southeastern Chongqing area

Рис. 5. Распределение коэффициента развития трещин в сланцах формации Лунмаси в юго-восточной части района Чунцин

The areas with high TOC content and brittle mineral content in Longmaxi Formation shale reservoirs are mainly located in the deposition center of black shale, namely Lianhu-Qianjiang and South Longshan areas. With the same comprehensive fracture coefficient, shale fractures with high TOC content and brittle mineral content are more developed. The eastern and southern parts of the study area have the most developed fractures, especially in the areas adjacent to the faults and the relatively strong-deformed grooved fold shafts, where some normal tensile faults have appeared. The southern part of the study area is the development zone of sandy shelf facies shale. The rock elastic modulus is high, and Poisson's ratio is low. It is prone to develop fractured under the action of external forces.

Conclusions

(1) The core of the numerical simulation method of the tectonic stress field lies in the establishment of the accurate geological model, mechanical model, and mathematical model. Given the particularity of shale reservoirs, the geological model must be used as the basis during the simulation process, and shale types and

rock mechanical properties must be classified according to rock facies.

(2) For the interior of the fold belt in the study area, especially the shale reservoir near the axis of the fold and the turning end, has suffered severe structural deformation, which is a highly concentrated area of stress. The end of the fault zone and the turning end are the continuous transition area from the broken shale inside the fault zone to the ordinary sedimentary strata, which is at the edge of rupture and has high-stress values. The black carbonaceous, siliceous, and calcareous shale of shallow sea shelf facies with stable distribution and weak structural deformation in the deposition center have high elastic modulus and low Poisson's ratio. These brittle shales are prone to develop structural fractures.

(3) The quantitative prediction of shale fracture distribution cannot be based on a single factor as the criterion. Otherwise, it will cause one-sided and limited results. The total fracture rate that affects the development of fractures in shale reservoirs should be considered as much as possible. This study found that fracture development areas are mostly concentrated in high-stress areas with severe structural deformation.

References

1. Jarvie D. M., Hill R. J., Ruble T. E., Pollastro R. M. Unconventional shale-gas systems: the Mississippian Barnett Shale of north-central Texas as one model for thermo-
genic shale-gas assessment. *AAPG Bulletin*. 2007;91(4): 475-499. <https://doi.org/10.1306/12190606068>.
2. Curtis J. B. Fractured shale-gas systems. *AAPG*



- Bulletin.* 2002;86(11):1921-1938. <https://doi.org/10.1306/61EEDDBE-173E-11D7-8645000102C1865D>.
3. Ross D. J. K., Bustin R. M. Shale gas potential of the Lower Jurassic Gordondale Member, northeastern British Columbia, Canada. *Bulletin of Canadian Petroleum Geology.* 2007;55(1):51-75. <https://doi.org/10.2113/gscpgbull.55.1.51>.
4. Gale J. F. W., Reed R. M., Holder J. Natural fractures in the Barnett Shale and their importance for hydraulic fracture treatments. *AAPG Bulletin.* 2007;91(4):603-622. <https://doi.org/10.1306/11010606061>.
5. Hill D. G., Lombardi T. E., Martin J. P. *Fractured gas shale potential in New York.* Available from: <https://treichlerlawoffice.com/radiation/HillNY.pdf> [Accessed 20th August 2021].
6. Zeng W., Zhang J., Ding W., Zhao S., Zhang Y., Liu Z., et al. Fracture development in Paleozoic shale of Chongqing area (South China). Part one: Fracture characteristics and comparative analysis of main controlling factors. *Journal of Asian Earth Sciences.* 2013;75(5):251-266. <https://doi.org/10.1016/j.jseas.2013.07.014>.
7. Ding W., Zhu D., Cai J., Gong M., Chen F. Analysis of the Developmental characteristics and major regulating factors of fractures in marine-continental transitional shale-gas reservoirs: a case study of the Carboniferous-Permian strata in the southeastern Ordos Basin, central China. *Marine and Petroleum Geology.* 2013;45:121-133. <https://doi.org/10.1016/j.marpetgeo.2013.04.022>.
8. Jiu K., Ding W., Huang W., Zhang Y., Zhao S., Hu L. Fractures of lacustrine shale reservoirs, the Zhanhua Depression in the Bohai Bay Basin, eastern China. *Marine and Petroleum Geology.* 2013;48:113-123. <https://doi.org/10.1016/j.marpetgeo.2013.08.009>.
9. Jiu K., Ding W., Huang W., You S., Zhang Y., Zeng W. Simulation of paleotectonic stress fields within Paleogene shale reservoirs and prediction of favorable zones for fracture development within the Zhanhua Depression, Bohai Bay Basin, east China. *Journal of Petroleum Science and Engineering.* 2013;110:119-131. <https://doi.org/10.1016/j.petrol.2013.09.002>.
10. Ding W., Fan T., Yu B., Huang X., Liu C. Ordovician carbonate reservoir fracture characteristics and fracture distribution forecasting in the Tazhong Area of Tarim Basin, Northwest China. *Journal of Petroleum Science and Engineering.* 2012;86-87:62-70. <https://doi.org/10.1016/j.petrol.2012.03.006>.
11. Atkinson B., Meredith P. Experimental fracture mechanics data for rocks and minerals. In: Atkinson B. K. (ed.). *Fracture mechanics of rock.* London: Academic Press; 1987. p.76-80.
12. Bewick R. P., Kaiser P. K., Bawden W. F. DEM simulation of direct shear: 2. Grain boundary and mineral grain strength component influence on shear rupture. *Rock Mechanics and Rock Engineering.* 2014;47:1673-1692. <https://doi.org/10.1007/s00603-013-0494-4>.
13. Jaeger J. C., Cook N. G. W. *Fundamentals of rock mechanics.* London: Chapman and Hall; 1976. 612 p.
14. Lama R. D., Vutukuri V. S. Handbook on mechanical properties of rocks. Vol. II. In: *Trans tech publications.* Clausthal; 1978. p.58-60.
15. Liu J., Ding W., Yang H., Wang R., Yin S., Li A., et al. 3D geomechanical modeling and numerical simulation of in-situ stress fields in shale reservoirs: a case study of the lower Cambrian Niutitang formation in the Cen'gong block, South China. *Tectonophysics.* 2017;712-713:663-683. <https://doi.org/10.1016/j.tecto.2017.06.030>.
16. Liu J., Ding W., Wang R., Yang H., Wang X., Li A. Methodology for quantitative prediction of fracture sealing with a case study of the lower Cambrian Niutitang Formation in the Cen'gong block in South China. *Journal of Petroleum Science and Engineering.* 2018;160:565-581. <https://doi.org/10.1016/j.petrol.2017.10.046>.
17. Mahmoodi S., Abbasi M., Sharifi M. New fluid flow model for hydraulic fractured wells with non-uniform fracture geometry and permeability. *Journal of Natural Gas Science and Engineering.* 2019;68:102914. <https://doi.org/10.1016/j.jngse.2019.102914>.
18. Oluwadebi A. G., Taylor K. G., Ma L. A case study on 3D characterisation of pore structure in a tight sandstone gas reservoir: the Collyhurst Sandstone, East Irish Sea Basin, northern England. *Journal of Natural Gas Science and Engineering.* 2019;68:102917. <https://doi.org/10.1016/j.jngse.2019.102917>.
19. Salamon M. D. G. Energy considerations in rock mechanics: fundamental results. *Journal of the Southern African Institute of Mining and Metallurgy.* 1984;84(8):233-246.
20. Wang R., Hu Z., Sun C., Liu Z., Zhang C., Gao B., et al. Comparative analysis of shale reservoir characteristics in the Wufeng-Longmaxi (O₃w-S₁) and Niutitang (C₁n) Formations: a case study of wells JY1 and TX1 in southeastern Sichuan Basin and its periphery, southwestern China. *Interpretation.* 2018;6(4):SN31-SN45. <https://doi.org/10.1190/int-2018-0024.1>.
21. Yang R., Jin Z., van Loon A. J., Han Z., Fan A. Climatic and tectonic controls of lacustrine hyperpycnic origination in the Late Triassic Ordos Basin, central China: implications for unconventional petroleum development. *AAPG Bulletin.* 2017;101(1):95-117. <https://doi.org/10.1306/06101615095>.

Список источников

1. Jarvie D. M., Hill R. J., Ruble T. E., Pollastro R. M. Unconventional shale-gas systems: the Mississippian Barnett Shale of north-central Texas as one model for thermo-genic shale-gas assessment // *AAPG Bulletin.* 2007. Vol. 91. Iss. 4. P. 475-499. <https://doi.org/10.1306/12190606068>.
2. Curtis J. B. Fractured shale-gas systems // *AAPG Bulletin.* 2002. Vol. 86. Iss. 11. P. 1921-1938. <https://doi.org/10.1306/61EEDDBE-173E-11D7-8645000102C1865D>.
3. Ross D. J. K., Bustin R. M. Shale gas potential of the Lower Jurassic Gordondale Member, northeastern British Columbia, Canada // *Bulletin of Canadian Petroleum Geology.* 2007. Vol. 55. Iss. 1. P. 51-75. <https://doi.org/10.2113/gscpgbull.55.1.51>.
4. Gale J. F. W., Reed R. M., Holder J. Natural fractures in the Barnett Shale and their importance for hydraulic fracture treatments // *AAPG Bulletin.* 2007. Vol. 91. Iss. 4.



P. 603–622. <https://doi.org/10.1306/11010606061>.

5. Hill D. G., Lombardi T. E., Martin J. P. Fractured gas shale potential in New York. [Электронный ресурс]. URL: <https://treichlerlawoffice.com/radiation/HillNY.pdf> (20.08.2021).

6. Zeng W., Zhang J., Ding W., Zhao S., Zhang Y., Liu Z., et al. Fracture development in Paleozoic shale of Chongqing area (South China). Part one: Fracture characteristics and comparative analysis of main controlling factors // Journal of Asian Earth Sciences. 2013. Vol. 75. Iss. 5. P. 251–266. <https://doi.org/10.1016/j.jseas.2013.07.014>.

7. Ding W., Zhu D., Cai J., Gong M., Chen F. Analysis of the Developmental characteristics and major regulating factors of fractures in marine-continental transitional shale-gas reservoirs: a case study of the Carboniferous-Permian strata in the southeastern Ordos Basin, central China // Marine and Petroleum Geology. 2013. Vol. 45. P. 121–133. <https://doi.org/10.1016/j.marpetgeo.2013.04.022>.

8. Jiu K., Ding W., Huang W., Zhang Y., Zhao S., Hu L. Fractures of lacustrine shale reservoirs, the Zhanhua Depression in the Bohai Bay Basin, eastern China // Marine and Petroleum Geology. 2013. Vol. 48. P. 113–123. <https://doi.org/10.1016/j.marpetgeo.2013.08.009>.

9. Jiu K., Ding W., Huang W., You S., Zhang Y., Zeng W. Simulation of paleotectonic stress fields within Paleogene shale reservoirs and prediction of favorable zones for fracture development within the Zhanhua Depression, Bohai Bay Basin, east China // Journal of Petroleum Science and Engineering. 2013. Vol. 110. P. 119–131. <https://doi.org/10.1016/j.petrol.2013.09.002>.

10. Ding W., Fan T., Yu B., Huang X., Liu C. Ordovician carbonate reservoir fracture characteristics and fracture distribution forecasting in the Tazhong Area of Tarim Basin, Northwest China // Journal of Petroleum Science and Engineering. 2012. Vol. 86–87. P. 62–70. <https://doi.org/10.1016/j.petrol.2012.03.006>.

11. Atkinson B., Meredith P. Experimental fracture mechanics data for rocks and minerals // Fracture mechanics of rock / B. K. Atkinson. London: Academic Press, 1987. P. 76–80.

12. Bewick R. P., Kaiser P. K., Bawden W. F. DEM simulation of direct shear: 2. Grain boundary and mineral grain strength component influence on shear rupture // Rock Mechanics and Rock Engineering. 2014. Vol. 47. P. 1673–1692. <https://doi.org/10.1007/s00603-013-0494-4>.

13. Jaeger J. C., Cook N. G. W. Fundamentals of rock mechanics. London: Chapman and Hall, 1976. 612 p.

14. Lama R. D., Vutukuri V. S. Handbook on mechanical properties of rocks. Vol. II // Trans tech publications. Clausthal, 1978. P. 58–60.

15. Liu J., Ding W., Yang H., Wang R., Yin S., Li A., et al. 3D geomechanical modeling and numerical simulation of in-situ stress fields in shale reservoirs: a case study of the lower Cambrian Niutitang formation in the Cen'gong block, South China // Tectonophysics. 2017. Vol. 712–713. P. 663–683. <https://doi.org/10.1016/j.tecto.2017.06.030>.

16. Liu J., Ding W., Wang R., Yang H., Wang X., Li A. Methodology for quantitative prediction of fracture sealing with a case study of the lower Cambrian Niutitang Formation in the Cen'gong block in South China // Journal of Petroleum Science and Engineering. 2018. Vol. 160. P. 565–581. <https://doi.org/10.1016/j.petrol.2017.10.046>.

17. Mahmoodi S., Abbasi M., Sharifi M. New fluid flow model for hydraulic fractured wells with non-uniform fracture geometry and permeability // Journal of Natural Gas Science and Engineering. 2019. Vol. 68. P. 102914. <https://doi.org/10.1016/j.jngse.2019.102914>.

18. Oluwadebi A. G., Taylor K. G., Ma L. A case study on 3D characterisation of pore structure in a tight sandstone gas reservoir: the Collyhurst Sandstone, East Irish Sea Basin, northern England // Journal of Natural Gas Science and Engineering. 2019. Vol. 68. P. 102917. <https://doi.org/10.1016/j.jngse.2019.102917>.

19. Salamon M. D. G. Energy considerations in rock mechanics: fundamental results // Journal of the Southern African Institute of Mining and Metallurgy. 1984. Vol. 84. Iss. 8. P. 233–246.

20. Wang R., Hu Z., Sun C., Liu Z., Zhang C., Gao B., et al. Comparative analysis of shale reservoir characteristics in the Wufeng-Longmaxi (O_3w-S_1l) and Niutitang (\mathcal{E}_1n) Formations: a case study of wells JY1 and TX1 in southeastern Sichuan Basin and its periphery, southwestern China // Interpretation. 2018. Vol. 6. Iss. 4. P. SN31–SN45. <https://doi.org/10.1190/int-2018-0024.1>.

21. Yang R., Jin Z., van Loon A. J., Han Z., Fan A. Climatic and tectonic controls of lacustrine hyperpycnic origination in the Late Triassic Ordos Basin, central China: implications for unconventional petroleum development // AAPG Bulletin. 2017. Vol. 101. Iss. 1. P. 95–117. <https://doi.org/10.1306/06101615095>.

Information about the authors / Информация об авторах



Wenlong Ding, PhD, professor, doctoral supervisor, major in petroleum geology, and has long been engaged in teaching and research on petroleum structure analysis and oil and gas control, formation mechanism and quantitative characterization of unconventional oil and gas reservoir fractures, and evaluation of engineering sweet spots.

Вэнълун Дин – доктор философии, профессор, научный руководитель докторских диссертаций, специалист в области нефтяной геологии, долгое время занимался преподаванием и исследованиями в области анализа структуры нефти и контроля нефти и газа, механизма образования и количественной характеристики необычных трещин в нефтегазовых коллекторах, а также оценки перспективных месторождений.

**Wenlong Ding,**

Dr. Sci. (Geol. & Mineral.), Professor,

School of Energy Resources,

Key Laboratory for Marine Reservoir Evolution and Hydrocarbon Abundance Mechanism, Ministry of Education,

Key Laboratory for Shale Gas Exploration and Assessment, Ministry of Land and Resources,

China University of Geosciences,

Beijing, China,

dingwenong2006@126.com,

<https://orcid.org/0000-0003-3669-3905>.

Дин Вэнълун,

доктор геолого-минералогических наук, профессор,

Школа Энергетических Ресурсов,

Главная лаборатория эволюции морских резервуаров и механизма распространения углеводородов,

Министерство образования,

Главная лаборатория по разведке и оценке запасов сланцевого газа, Министерство земли и ресурсов,

Китайский университет геологических наук,

г. Пекин, Китай,

dingwenong2006@126.com,

<https://orcid.org/0000-0003-3669-3905>.

Weite Zeng,

Hainan Geological Survey,

Haikou, China.

Цзэн Вэйтэ,

Геологическая служба Хайнаня,

г. Хайкоу, Китай.

Ruyue Wang,

School of Energy Resources,

Key Laboratory for Marine Reservoir Evolution and Hydrocarbon Abundance Mechanism, Ministry of Education,

Key Laboratory for Shale Gas Exploration and Assessment, Ministry of Land and Resources,

China University of Geosciences,

Beijing, China.

Ван Жуюэ,

Школа Энергетических Ресурсов,

Главная лаборатория эволюции морских резервуаров и механизма распространения углеводородов,

Министерство образования,

Главная лаборатория по разведке и оценке запасов сланцевого газа, Министерство земли и ресурсов,

Китайский университет геологических наук,

г. Пекин, Китай.

Kai Jiu,

Beijing Jingneng Petroleum Corporation Limited,

Beijing, China.

Цзю Кай,

Пекинская нефтепромысловая корпорация Цзиннэн,

г. Пекин, Китай.

Zhe Wang,

Shandong Kerui Group Holding Corporation Limited,

Dongying, China.

Ван Чжэ,

Шаньдун Кэжуй Групп Холдинг Лимитед,

г. Дунъин, Китай.

Yaxiong Sun,

School of Energy Resources,

Key Laboratory for Marine Reservoir Evolution and Hydrocarbon Abundance Mechanism, Ministry of Education,

Key Laboratory for Shale Gas Exploration and Assessment, Ministry of Land and Resources,

China University of Geosciences,

Beijing, China.



Сунь Ясон,

Школа Энергетических Ресурсов,

Главная лаборатория эволюции морских резервуаров и механизма распространения углеводородов,

Министерство образования,

Главная лаборатория по разведке и оценке запасов сланцевого газа, Министерство земли и ресурсов,

Китайский университет геологических наук,

г. Пекин, Китай.

Xinghua Wang,

School of Energy Resources,

Key Laboratory for Marine Reservoir Evolution and Hydrocarbon Abundance Mechanism, Ministry of Education,

Key Laboratory for Shale Gas Exploration and Assessment, Ministry of Land and Resources,

China University of Geosciences,

Beijing, China.

Ван Синхуа,

Школа Энергетических Ресурсов,

Главная лаборатория эволюции морских резервуаров и механизма распространения углеводородов,

Министерство образования,

Главная лаборатория по разведке и оценке запасов сланцевого газа, Министерство земли и ресурсов,

Китайский университет геологических наук,

г. Пекин, 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.

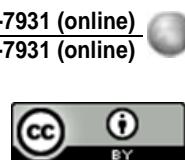
The final manuscript has been read and approved by all the co-authors.

Все авторы прочитали и одобрили окончательный вариант рукописи.

Information about the article / Информация о статье

The article was submitted 03.09.2021; approved after reviewing 06.10.2021; accepted for publication 12.11.2021.

Статья поступила в редакцию 03.09.2021; одобрена после рецензирования 06.10.2021; принята к публикации 12.11.2021.



Научная статья

УДК 552.578.2+519.677+004.032.26

<https://doi.org/10.21285/2686-9993-2021-44-4-408-416>

Разработка новой эмпирической корреляции для прогнозирования объемного коэффициента пластовой нефти с использованием методов искусственного интеллекта

Эльвира Венеровна Шакирова^a, Александр Андреевич Александров^b,
Михаил Вячеславович Семыкин^c

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

^bТюменский государственный университет, г. Тюмень, Россия

Автор, ответственный за переписку: Шакирова Эльвира Венеровна, viva160@mail.ru

Резюме. Известно, что для нефти, находящейся в пластовых условиях, характерно содержание определенного количества растворенного газа. В процессе снижения пластового давления этот газ выделяется из нефти, существенно изменяя ее физические свойства, в первую очередь плотность и вязкость. Кроме того, происходит уменьшение объема нефти, иногда на 50–60 %. В связи с этим при подсчете запасов необходимо обосновать величину, на которую уменьшится объем пластовой нефти после извлечения ее на поверхность. Для этого введено понятие объемного коэффициента пластовой нефти. Объемный коэффициент нефти считается одним из основных параметров, необходимых для определения характеристик сырой нефти, а также для моделирования и прогнозирования характеристик нефтяного коллектора. Целью данного исследования являлась разработка новой эмпирической корреляции для прогнозирования объемного коэффициента пластовой нефти с использованием методов искусственного интеллекта на базе программного обеспечения MATLAB, таких как искусственная нейронная сеть, адаптивная нейро-нечеткая система вывода и метод опорных векторов. В работе представлена новая эмпирическая корреляция, извлеченная из искусственной нейронной сети на основе 503 экспериментальных точек данных для нефти с месторождения Восточной Сибири, которая помогла спрогнозировать объемный коэффициент нефти с коэффициентом корреляции 0,969 и средней абсолютной ошибкой меньше 1 %. Проведенное исследование показывает, что точность прогнозирования искомого параметра в разработанной модели искусственного интеллекта превосходит точность результатов исследований с применением обычных статистических методов. Также данная модель может быть полезна в перспективе оптимизации процессов при планировании и разработке месторождений.

Ключевые слова: объемный коэффициент нефти, искусственный интеллект, нейронные сети, коэффициент корреляции

Для цитирования: Шакирова Э. В., Александров А. А., Семыкин М. В. Разработка новой эмпирической корреляции для прогнозирования объемного коэффициента пластовой нефти с использованием методов искусственного интеллекта // Науки о Земле и недропользование. 2021. Т. 44. № 4. С. 408–416. <https://doi.org/10.21285/2686-9993-2021-44-4-408-416>.

Original article

Development of a new empirical correlation for predicting formation volume factor of reservoir oil using artificial intelligence

Elvira V. Shakirova^a, Aleksandr A. Aleksandrov^b, Mikhail V. Semykin^c

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

^bUniversity of Tyumen, Tyumen, Russia

Corresponding author: Elvira V. Shakirova, viva160@mail.ru

Abstract. It is known that oil in reservoir conditions is characterized by the content of a certain amount of dissolved gas. As reservoir pressure decreases this gas is released from oil significantly changing its physical properties, primarily its density and viscosity. In addition, the oil volume also reduces, sometimes by 50–60 %. In this regard, when calculating reserves, it is necessary to justify the reduction amount of the reservoir oil volume when oil is extracted to the surface. For this purpose, the concept of formation volume factor of reservoir oil has been introduced. The formation volume factor

© Шакирова Э. В., Александров А. А., Семыкин М. В., 2021



of oil is considered one of the main characterizing parameters of crude oil. It is also required for modeling and predicting the characteristics of an oil reservoir. The purpose of the present work is to develop a new empirical correlation for predicting the formation volume factor of reservoir oil using artificial intelligence methods based on MATLAB software, such as: an artificial neural network, an adaptive neuro-fuzzy inference system, and a support vector machine. The article presents a new empirical correlation extracted from the artificial neural network based on 503 experimental data points for oils from the Eastern Siberia field, which was able to predict the formation volume factor of oil with the correlation coefficient of 0.969 and average absolute error of less than 1 %. The conducted study shows that the prediction accuracy of the desired parameter in the developed artificial intelligence model exceeds the accuracy of study results obtained by conventional statistical methods. Moreover, the model can be useful in the prospect of process optimization in field planning and development.

Keywords: oil formation factor, artificial intelligence, neural networks, correlation coefficient

For citation: Shakirova E. V., Aleksandrov A. A., Semykin M. V. Development of a new empirical correlation for predicting formation volume factor of reservoir oil using artificial intelligence. *Nauki o Zemle i nedropol'zovanie = Earth sciences and subsoil use*. 2021;44(4):408-416. (In Russ.). <https://doi.org/10.21285/2686-9993-2021-44-4-408-416>.

Введение

Свойства пластовой нефти имеют решающее значение для вычислительных технологий в области разработки месторождений. Эти свойства включают коэффициент объема нефтяного пласта, давление насыщения, газорасторимость в нефти и т. д. Коэффициент объема нефтяного пласта определяет соотношение между объемом нефти в пласте с растворенным газом и объемом нефти на поверхности. Для всех расчетов материального баланса требуется объемный коэффициент пластовой нефти для определения объема коллектора после процесса истощения. Объемный коэффициент нефти сильно зависит от пластового давления, и в некоторых случаях данные по коэффициенту объема нефтеносного пласта недоступны. Поэтому следует разработать корреляции и модели для прогнозирования, которые могут быть использованы в расчетных моделях коллектора.

Приложения для разработки месторождений, такие как уравнение материального баланса, моделирование коллектора и испытания скважин, нуждаются в свойствах давления, объема и температуры нефтяных пластовых флюидов, и одним из этих свойств является объемный коэффициент пластовой нефти. Объемным коэффициентом нефти называют отношение объема нефти, который она занимает в пластовых условиях, к объему получаемой из нее дегазированной нефти в стандартных условиях.

Целью данной работы являлась разработка новой эмпирической корреляции для прогнозирования объемного коэффициента пластовой нефти с использованием методов

искусственного интеллекта, таких как искусственная нейронная сеть (англ.: Artificial neural networks, ANN), адаптивная нейро-нечеткая система вывода (англ.: Adaptive neuro-fuzzy inference system, ANFIS) и метод опорных векторов (англ.: Support vector machine, SVM).

Материалы и методы исследования

Первым шагом проведенного исследования стал сбор данных с нефтегазоконденсатного месторождения Восточной Сибири. Этап обработки этой информации включал в себя проверку качества доступных данных, удаление выбросов и при необходимости применение техники нормализации [1]. Искомыми параметрами были объемный коэффициент нефти b , газонасыщенность G , плотность газа ρ_g , плотность нефти ρ_n и температура коллектора T . Данные образцов нефти, собранных с исследуемого месторождения (503 точки), приведены в таблице.

Газонасыщенность находилась в диапазоне 311 м³/т с минимальным значением 9 м³/т и максимальным значением 7283 м³/т. Плотность газа имела диапазон 0,8 кг/м³ с минимальным значением 0,713 кг/м³ и максимальным значением 0,856 кг/м³. Плотность нефти находилась в диапазоне 0,848 т/м³ с минимальным значением 0,81 т/м³ и максимальным значением 0,884 т/м³. Температура коллектора имела диапазон 16 °C с минимальным значением 14 °C и максимальным значением 24 °C. Объемный коэффициент нефти имел диапазон 1,184 м³/м³ с минимальным значением 1,138 м³/м³ и максимальным значением 1,29 м³/м³.



Полученные данные с месторождения Восточной Сибири

Data obtained on the field in Eastern Siberia

Номер образца	Входные параметры				Выходной параметр Объемный коэффициент нефти, м ³ /м ³
	Газонасыщенность, м ³ /т	Плотность газа, кг/м ³	Плотность нефти, т/м ³	Температура коллектора, °C	
1	1390	0,81	0,81	24	1,29
2	4476	0,803	0,85	14	1,14
3	5377	0,786	0,85	14	1,14
4	54	0,856	0,849	16	1,18
5	45	0,791	0,849	16	1,18
6	742	0,713	0,849	16	1,18
7	31	0,82	0,849	16	1,18
...
501	149	0,8	0,884	20,8	1,19
502	217	0,8	0,832	20	1,23
503	131	0,8	0,832	20	1,23

Вторым шагом в исследовании стала разработка и обучение трех моделей искусственного интеллекта для прогнозирования искомого параметра [1].

Для первой модели был реализован алгоритм нейронной сети обратного распространения. Предлагаемая модель искусственной нейронной сети была основана на газонасыщенности, плотности газа, плотности нефти и температуре коллектора с одним скрытым слоем и одним выходным параметром. Количество нейронов в скрытом слое оказалось равным 20. В качестве передаточной функции между входным и скрытым слоями использовалась функция активации сигмоидального типа, а также функция активации линейного типа между скрытым и выходным слоями. Алгоритм обратного распространения Левенберга – Марквардта был выбран в качестве алгоритма обучения для получения весов и смещений [2]. Во избежание застrevания модели на локальных минимумах было выполнено 10000 реализаций с инициализацией различных весов и смещений на этапах обучения и перекрестной проверки моделирования. После обучения были извлечены веса и смещения из оптимальной модели [3, 4].

Вторая модель была основана на типе Genfis2 [5, 6] (субтрактивная кластеризация) с радиусом кластера 0,5. Оптимальный размер радиуса кластера был найден путем анализа чувствительности радиусов кластера от 0,1 до 1. Оптимальный размер эпохи был найден равным 500. Чтобы избежать застrevания

модели на локальных минимумах, было выполнено 10000 реализаций.

Третья модель была основана на функции ядра гауссовского типа с параметром регуляризации С, равным 5000. Функция ядра гауссовского типа была выбрана путем сравнения производительности прогнозирования с функцией ядра полиномиального типа [7, 8], поскольку функция ядра гауссовского типа предсказывала лучшие результаты, чем функция ядра полиномиального типа. Оптимальное значение параметра регуляризации было найдено равным 5000 путем определения параметров чувствительности значений от 250 до 5000.

Результаты исследования

Искусственная нейронная сеть – это самый мощный статистический инструмент для распознавания и классификации сложных паттернов и систем, которые не может сделать человеческий мозг. Метод искусственной нейронной сети основан на биологических нейронах, обнаруженных в человеческом мозге. Данная модель содержит основной блок обработки, называемый нейронами. Модели нейронных сетей состоят из трех компонентов: алгоритма обучения, передаточной функции и сетевой архитектуры [2]. Сетевая модель состоит как минимум из трех слоев: входного, скрытого и выходного. Каждый слой соединяется с другими слоями с помощью узелей. Производительность сети основана исключительно на регулировке весов



между этими уровнями [3, 4]. Результат обучения первой модели искусственного интеллекта приведен на рис. 1.

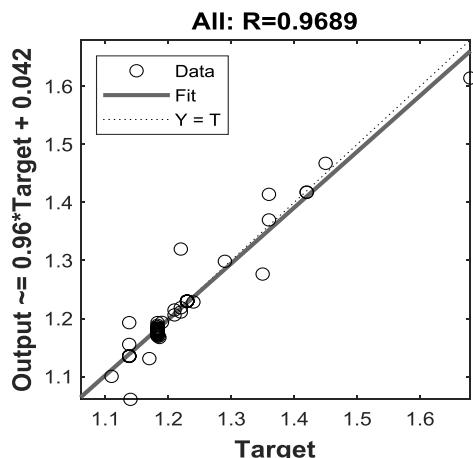


Рис. 1. Результаты обучения первой модели искусственного интеллекта

Fig. 1. Training results of the first model of artificial intelligence

Адаптивная нейро-нечеткая система вывода также приобретает доминирующее значение в нефтяной промышленности. Многие исследователи использовали в рассматриваемой отрасли данную систему для определения сложных концепций [6, 7]. Адаптивная нейро-нечеткая система вывода – это сочетание нейронной сети и нечеткой логики, а также

очень надежной техники контролируемого обучения. Это разновидность нейронной сети, в которой используется система нечеткого вывода Сугено [8]. Данный метод позволяет извлекать преимущества обоих упомянутых методов искусственного интеллекта на единой платформе. Чтобы получить от адаптивной нейро-нечеткой системы вывода максимальную отдачу, следует использовать любой эволюционный алгоритм для оптимизации параметров этого метода [4].

Нечеткая логика сопоставляет входные параметры с входными функциями принадлежности, преобразовывая входные функции принадлежности в набор нечетких правил, а набор нечетких правил – в выходные характеристики, затем – выходные характеристики в выходные функции принадлежности и, наконец, эту функцию принадлежности в однозначные выходные данные или любую классификацию на основе на выходе [5]. Вместо того, чтобы просто фиксировать форму функции принадлежности, метод адаптивной нейро-нечеткой системы вывода автоматически присваивает тип и форму функции принадлежности путем анализа данных [9]. Результаты обучения второй модели искусственного интеллекта приведены на рис. 2.

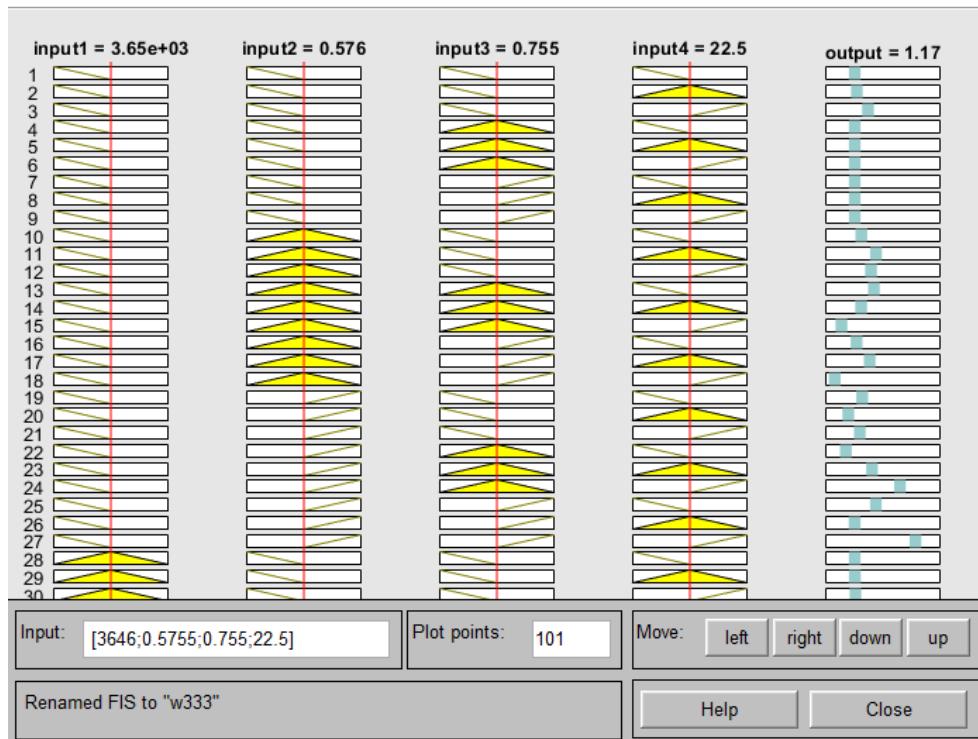


Рис. 2. Результаты обучения второй модели искусственного интеллекта
Fig. 2. Training results of the second model of artificial intelligence



Метод опорных векторов – это тип обучения, который используется в основном для целей регрессии и распознавания образов [10, 11]. Метод опорных векторов гиперплоскости был представлен в качестве новой инструментальной среды искусственного интеллекта как для классификации, так и для аппроксимации функций [12, 13]. Вместо передаточной функции сигмоидального типа, как в первой модели, данный метод опирается на функцию ядра нейрона, которая позволяет проецировать объект исследования на более сложные плоскости и может решать более сложные высоконелинейные задачи [14–16]. Результаты обучения третьей модели искусственного интеллекта приведены на рис. 3.

В ходе исследования выяснилось, что первая модель смогла предсказать объемный коэффициент с коэффициентом корреляции 0,969 и средней абсолютной ошибкой 0,11 %. Вторая модель смогла предсказать объемный коэффициент с коэффициентом корреляции 0,84 и средней абсолютной ошибкой 1,5 %. Третья модель смогла предсказать объемный коэффициент с коэффициентом корреляции 0,946 и средней абсолютной ошибкой 3,5 % при сравнении фактических и прогнозируемых значений объемного коэффициента.

Обсуждение полученных результатов

Объемный коэффициент нефти является важным параметром для дальнейшего определения запасов нефти и подсчета материального баланса месторождения [17–20]. Разработанные модели искусственного интеллекта показали большой коэффициент корреляции для определения объемного коэффициента нефти: 0,969, 0,84 и 0,946 соответственно. Методы машинного обучения свидетельствуют о хорошем прогнозе данных тестов и их способности выполнять расчеты, для которых ранее использовались традиционные статистические методы. На каждом этапе цепочки разработки нефтегазовых запасов возможно существенное ускорение и удешевление процессов, повышение эффективности при помощи использования массива данных, который накапливается во время работы, для дальнейшего обучения нейронных сетей. Внедрение сквозных цифровых технологий в нефтегазовой отрасли понятно в плане применения и экономически обосновано. Искусственный интеллект является наилучшим методом определения объемного коэффициента пластовой нефти благодаря высокой скорости и точности, когнитивные технологии широко применяются в обработке больших данных.

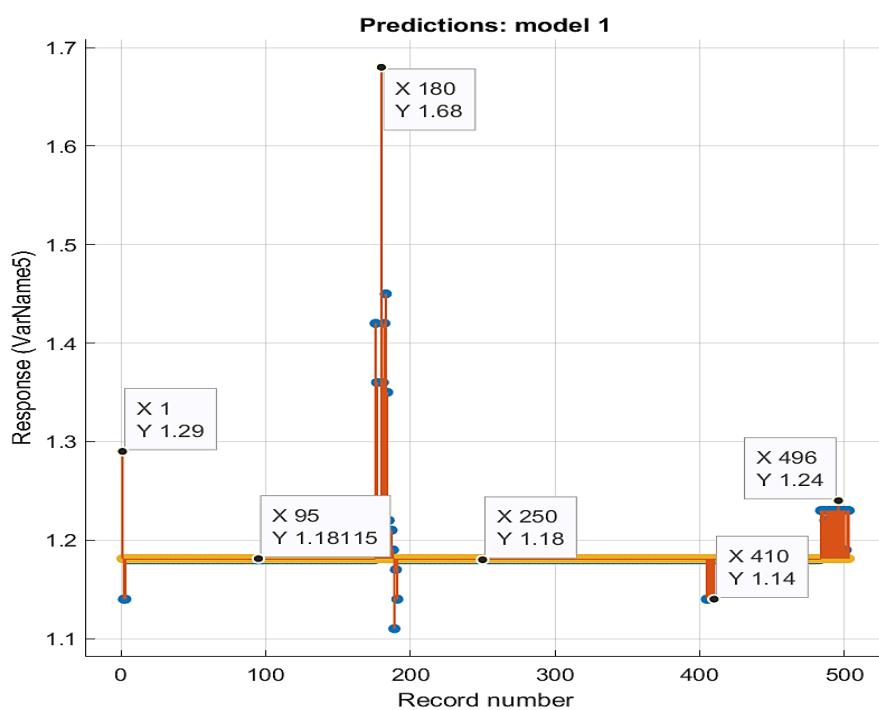


Рис. 3. Результаты обучения третьей модели искусственного интеллекта
Fig. 3. Training results of the third model of artificial intelligence



Заключение

Таким образом, в ходе проведенного исследования были разработаны три модели искусственного интеллекта для прогнозирования объемного коэффициента как функции газосодержания, плотности газа, плотности нефти и температуры коллектора. На основании полученных результатов можно сделать следующие выводы:

– первая разработанная модель является лучшим методом искусственного интеллекта,

который может предсказать объемный коэффициент нефти по таким параметрам, как газосодержание, плотность газа, плотность нефти и температура коллектора;

– модель искусственной нейронной сети имеет коэффициент корреляции 0,97 и среднюю абсолютную ошибку менее 1 %;

– модель искусственной нейронной сети может использоваться на производстве для прогнозирования объемного коэффициента с высокой точностью.

Список источников

1. Lippmann R. P. An introduction to computing with neural nets // IEEE ASSP Magazine. 1987. Vol. 4. Iss. 2. P. 4–22.
2. Hinton G. E., Osindero S., Teh Y.-W. A fast learning algorithm for deep belief nets // Neural Computation. 2006. Vol. 18. Iss. 7. P. 1527–1554. <https://doi.org/10.1162/neco.2006.18.7.1527>.
3. Rammay M. H., Abdulraheem A. Automated history matching using combination of adaptive neuro fuzzy system (ANFIS) and differential evolution algorithm // SPE Large Scale Computing and Big Data Challenges in Reservoir Simulation Conference and Exhibition. Istanbul, 2014. SPE-172992-MS.
4. Ben-Hur A., Horn D., Siegelmann H. T., Vapnik V. Support vector clustering // Journal of Machine Learning Research. 2001. Vol. 2. P. 125–137.
5. Jeng J.-T., Chuang C.-C., Su S.-F. Support vector interval regression networks for interval regression analysis // Fuzzy Sets and Systems. 2003. Vol. 138. Iss. 2. P. 283–300. [https://doi.org/10.1016/S0165-0114\(02\)00570-5](https://doi.org/10.1016/S0165-0114(02)00570-5).
6. Tahmasebi P., Hezarkhani A. A hybrid neural networks-fuzzy logic-genetic algorithm for grade estimation // Computers & Geosciences. 2012. Vol. 42. P. 18–27. <https://doi.org/10.1016/j.cageo.2012.02.004>.
7. Klir G., Yuan B. Fuzzy sets and fuzzy logic: theory and applications. New Jersey: Prentice Hall, 1995. 574 p.
8. Kaydani H., Mohebbi A., Baghaie A. Neural fuzzy system development for the prediction of permeability from wireline data based on fuzzy clustering // Petroleum Science and Technology. 2012. Vol. 30. Iss. 19. P. 2036–2045. <https://doi.org/10.1080/10916466.2010.531345>.
9. Press W. H., Teukolsky S. A., Vetterling W. T., Flannery B. P. Numerical recipes. The art of scientific computing. New York: Cambridge University Press, 2007. 1235 p.
10. Trontl K., Šmuc T., Pevec D. Support vector regression model for the estimation of γ -ray buildup factors for multi-layer shields // Annals of Nuclear Energy. 2007. Vol. 34. Iss. 12. P. 939–952. <https://doi.org/10.1016/j.anucene.2007.05.001>.
11. Gholami R., Shahraki A. R., Jamali Paghaleh M. Prediction of hydrocarbon reservoirs permeability using support vector machine // Mathematical Problems in Engineering. 2012. <https://doi.org/10.1155/2012/670723>.
12. Семыкин М. В., Шакирова Э. В. Исследование по подбору эффективных деэмульгаторов при обезвоживании нефтий Восточной Сибири // 60 лет снимкам обратной стороны Луны: материалы Всерос. науч.-практ. конф. Иркутск: Изд-во ИРНИТУ, 2019. С. 76–81.
13. Gaisina L. M., Mikhailovskaya I. M., Khairullina N. G., Pilipenko L. M., Shakirova E. V. Features of the formation of the corporate identity of the staff // Biosciences Biotechnology Research Asia. 2015. Vol. 12. Iss. 3. P. 2543–2555. <https://doi.org/10.13005/bbra/1934>.
14. Averkina E. V., Shakirova E. V. Specifics of drilling wells in the abnormally-high-pressure rock beds in the oil-and-gas fields of Eastern Siberia // IOP Conference. Series: Earth and Environmental Science. 2019. Vol. 229. P. 012032. <https://doi.org/10.1088/1755-1315/229/1/012032>.
15. Белозерова О. В., Коваленко В. В., Шакирова Э. В. Исследование состава и свойств нефти Ичединского месторождения // Известия вузов. Прикладная химия и биотехнология. 2020. Т. 10. № 3. С. 522–528. <https://doi.org/10.21285/2227-2925-2020-10-3-522-528>.
16. Аверкина Е. В., Шакирова Э. В., Николаева М. Б., Климова А. А. Сравнительный анализ реагентов-ингибиторов набухания глинистых отложений, применяемых на месторождениях Восточной Сибири // Известия Томского политехнического университета. Инженеринг георесурсов. 2020. Т. 331. № 12. С. 138–145. <https://doi.org/10.18799/24131830/2020/12/2947>.
17. Gorokhova A. E., Gaisina L. M., Gareev E. S., Shutov N. V., Shakirova E. V. Application of coaching methods at agricultural and industrial enterprises to improve the quality of young specialists' adaptation // Quality – Access to Success. 2018. Vol. 19. Iss. 164. P. 103–108.
18. Gaisina L. M., Mikhailovskaya I. M., Khairullina N. G., Ustinova O. V., Shakirova E. V. The role of the media in the spiritual and moral evolution of society // Mediterranean Journal of Social Sciences. 2015. Vol. 6. Iss. 5. P. 93–101. <https://doi.org/10.5901/mjss.2015.v6n5s2p93>.
19. Gaisina L. M., Dorozhkin Yu. N., Iakupova G. A., Rasuleva I. V., Dallakian G. R., Shakirova E. V. Reflection of contemporary socio-cultural factors on young rural family as a problem of rural development. A study case-the Republic of Bashkortostan // Scientific Papers. Series: Management, Economic Engineering in Agriculture and Rural Development. 2018. Vol. 18. Iss. 3. P. 131–138.



20. Шакирова Э. В., Семыкин М. В., Александров А. А., Брыжеватых Н. В. Современные методы по подбору деэмульгаторов при обезвоживании нефти

Восточной Сибири // Проблемы сбора, подготовки и транспорта нефти и нефтепродуктов. 2021. № 3. С. 36–44. <https://doi.org/10.17122/ntj-oil-2021-3-36-44>.

References

1. Lippmann R. P. An introduction to computing with neural nets. *IEEE ASSP Magazine*. 1987;4(2):4-22.
2. Hinton G. E., Osindero S., Teh Y.-W. A fast learning algorithm for deep belief nets. *Neural Computation*. 2006;18(7):1527-1554. <https://doi.org/10.1162/neco.2006.18.7.1527>.
3. Rammay M. H., Abdulraheem A. Automated history matching using combination of adaptive neuro fuzzy system (ANFIS) and differential evolution algorithm. In: *SPE Large Scale Computing and Big Data Challenges in Reservoir Simulation Conference and Exhibition*. Istanbul; 2014. SPE-172992-MS.
4. Ben-Hur A., Horn D., Siegelmann H. T., Vapnik V. Support vector clustering. *Journal of Machine Learning Research*. 2001;2:125-137.
5. Jeng J.-T., Chuang C.-C., Su S.-F. Support vector interval regression networks for interval regression analysis. *Fuzzy Sets and Systems*. 2003;138(2):283-300. [https://doi.org/10.1016/S0165-0114\(02\)00570-5](https://doi.org/10.1016/S0165-0114(02)00570-5).
6. Tahmasebi P., Hezarkhani A. A hybrid neural networks-fuzzy logic-genetic algorithm for grade estimation. *Computers & Geosciences*. 2012;42:18-27. <https://doi.org/10.1016/j.cageo.2012.02.004>.
7. Klir G., Yuan B. *Fuzzy sets and fuzzy logic: theory and applications*. New Jersey: Prentice Hall; 1995. 574 p.
8. Kaydani H., Mohebbi A., Baghaie A. Neural fuzzy system development for the prediction of permeability from wireline data based on fuzzy clustering. *Petroleum Science and Technology*. 2012;30(19):2036-2045. <https://doi.org/10.1080/10916466.2010.531345>.
9. Press W. H., Teukolsky S. A., Vetterling W. T., Flannery B. P. *Numerical recipes. The art of scientific computing*. New York: Cambridge University Press; 2007. 1235 p.
10. Trontl K., Šmuc T., Pevec D. Support vector regression model for the estimation of γ-ray buildup factors for multi-layer shields. *Annals of Nuclear Energy*. 2007;34(12):939-952. <https://doi.org/10.1016/j.anucene.2007.05.001>.
11. Gholami R., Shahraki A. R., Jamali Paghaleh M. Prediction of hydrocarbon reservoirs permeability using support vector machine. *Mathematical Problems in Engineering*. 2012. <https://doi.org/10.1155/2012/670723>.
12. Semykin M. V., Shakirova E. V. Research on selection of effective demulsifiers for dehydration of Eastern Siberian oils. In: *60 let snimkam obratnoi storony Luny: materialy Vserossiiskoi nauchno-prakticheskoi konferentsii = 60th anniversary of images of the back side of the Moon: materials of the All-Russian scientific and practical conference*. Irkutsk: Irkutsk National Research Technical University; 2019. p.76–81. (In Russ.).
13. Gaisina L. M., Mikhaylovskaya I. M., Khairullina N. G., Pilipenko L. M., Shakirova E. V. Features of the formation of the corporate identity of the staff. *Biosciences Biotechnology Research Asia*. 2015;12(3):2543-2555. <https://doi.org/10.13005/bbra/1934>.
14. Averkina E. V., Shakirova E. V. Specifics of drilling wells in the abnormally-high-pressure rock beds in the oil-and-gas fields of Eastern Siberia. *IOP Conference. Series: Earth and Environmental Science*. 2019;229:012032. <https://doi.org/10.1088/1755-1315/229/1/012032>.
15. Belozerova O. V., Kovalenko V. V., Shakirova E. V. Study of the composition and properties of crude oil mined at the Ichyodinskoye field. *Izvestiya vuzov. Prikladnaya khimiya i biotekhnologiya = Proceedings of Universities. Applied Chemistry and Biotechnology*. 2020;10(3):522-528. (In Russ.). <https://doi.org/10.21285/2227-2925-2020-10-3-522-528>.
16. Averkina E. V., Shakirova E. V., Nikolaeva M. B., Klimova A. A. Comparative analysis of reagents-inhibitors of swelling of clay deposits used in Eastern Siberia. *Izvestiya Tomskogo politekhnicheskogo universiteta. Inzhiniring georesursov = Bulletin of the Tomsk Polytechnic University. Geo Assets Engineering*. 2020;331(12):138-145. (In Russ.). <https://doi.org/10.18799/24131830/2020/12/2947>.
17. Gorokhova A. E., Gaisina L. M., Gareev E. S., Shutov N. V., Shakirova E. V. Application of coaching methods at agricultural and industrial enterprises to improve the quality of young specialists' adaptation. *Quality – Access to Success*. 2018;19(164):103-108.
18. Gaisina L. M., Mikhaylovskaya I. M., Khairullina N. G., Ustinova O. V., Shakirova E. V. The role of the media in the spiritual and moral evolution of society. *Mediterranean Journal of Social Sciences*. 2015;6(5):93-101. <https://doi.org/10.5901/mjss.2015.v6n5s2p93>.
19. Gaisina L. M., Dorozhkin Yu. N., Iakupova G. A., Rasuleva I. V., Dallakian G. R., Shakirova E. V. Reflection of contemporary socio-cultural factors on young rural family as a problem of rural development. A study case-the Republic of Bashkortostan. *Scientific Papers. Series: Management, Economic Engineering in Agriculture and Rural Development*. 2018;18(3):131-138.
20. Shakirova E. V., Semykin M. V., Aleksandrov A. A., Bryzhevatykh N. V. Modern methods for the selection of effective demulgators for oil dehydration in Eastern Siberia. *Problemy sbora, podgotovki i transporta nefti i nefteproduktov = Problems of Gathering, Treatment and Transportation of Oil and Oil Products*. 2021;3:36-44. (In Russ.). <https://doi.org/10.17122/ntj-oil-2021-3-36-44>.



Информация об авторах / Information about the authors



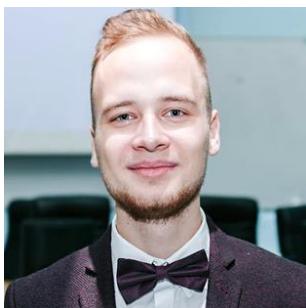
Шакирова Эльвира Венеровна,
кандидат политических наук, доцент,
доцент кафедры нефтегазового дела,
Институт недропользования,
Иркутский национальный исследовательский технический университет,
г. Иркутск, Россия,
viva160@mail.ru,
<https://orcid.org/0000-0003-0605-2920>.

Elvira V. Shakirova,
Cand. Sci. (Polit.), Associate Professor,
Associate Professor of the Department of Oil and Gas Engineering,
Institute of Subsoil Use,
Irkutsk National Research Technical University,
Irkutsk, Russia,
viva160@mail.ru,
<https://orcid.org/0000-0003-0605-2920>.



Александров Александр Андреевич,
студент,
Политехническая школа,
Тюменский государственный университет,
г. Тюмень, Россия,
kavabanga1999@mail.ru,
<https://orcid.org/0000-0001-6925-762X>.

Aleksandr A. Aleksandrov,
Student,
Polytechnic School,
University of Tyumen,
Tyumen, Russia,
kavabanga1999@mail.ru,
<https://orcid.org/0000-0001-6925-762X>.



Семыкин Михаил Вячеславович,
студент,
Институт недропользования,
Иркутский национальный исследовательский технический университет,
г. Иркутск, Россия,
siemykin99@mail.ru,
<https://orcid.org/0000-0002-6134-1656>.

Mikhail V. Semykin,
Student,
Institute of Subsoil Use,
Irkutsk National Research Technical University,
Irkutsk, Russia,
siemykin99@mail.ru,
<https://orcid.org/0000-0002-6134-1656>.

Вклад авторов / Contribution of the authors

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

Конфликт интересов / Conflict of interests

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



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

Информация о статье / Information about the article

Статья поступила в редакцию 27.08.2021; одобрена после рецензирования 14.10.2021; принята к публикации 18.11.2021.

The article was submitted 27.08.2021; approved after reviewing 14.10.2021; accepted for publication 18.11.2021.



Original article

<https://doi.org/10.21285/2686-9993-2021-44-4-417-432>



The ore prospecting prediction model for the Huili copper orefield in Sichuan Province, China*

Lujun Lin^a, Hui Chen^b, Zhenshan Pang^c, Zhizhong Cheng^d, Jianling Xue^e,
Wen Tao^f, Yixing Ma^g, Lingming Gong^h, Hongtao Shenⁱ

^aInstitute of Geophysical and Geochemical Exploration, Chinese Academy of Geological Sciences, Langfang, China

^{b-e,g}Development Research Center, China Geological Survey, Beijing, China

^{b-g}Technical Guidance Center for Mineral Resources Exploration,

Ministry of Natural Resources of the People's Republic of China, Beijing, China

^{h,i}Sichuan Bureau of Geology and Mineral Resources, Emeishan, China

Corresponding author: Hui Chen, cgschenhui@163.com

Abstract. The prediction theory and methodology of ore prospecting were developed from an in-depth study of 129 typical deposits in China. It has been verified to be an effective method that is particularly suitable for the initial ore prospecting. In this method, the internal and external factors of metallogenesis are combined together to construct a geological model of prospecting prediction, which consists of metallogenic geological body, metallogenic structure, metallogenic structural plane and metallogenic characteristics. The Huili area is located in the western margin of the Yangtze Plate, where the regional metallogenic geological conditions are superior, and a series of unique iron-copper deposits were formed. In recent years, great breakthroughs and progress have been made in the deep and peripheral areas of the Huili copper orefield. Herein, we take the Huili copper orefield as a typical example to illustrate the specific application of this method in deep ore prospecting of hydrothermal deposits. The metallogenic geological body is the ore-hosting volcanic rocks (albitite in the Hekou Group), and the main metallogenic structure and structural planes are interfaces between basic (intermediate) volcanic rocks and sedimentary rocks and the possible volcanic vent. Combined with the summary of metallogenic characteristics, we constructed a geological model for ore prospecting in the Huili copper orefield.

Keywords: ore prospecting prediction model, mineral exploration, Huili copper orefield, volcanogenic massive sulfide deposits

Funding: this study was supported by National Key Research and Development Program of China (2017YFC0601506), National Nature Science Foundation (42002102) and Geological Survey Project of China Geological Survey (DD20190570). We thank Tianzhu Ye for his kind guidance throughout the study.

For citation: Lin Lujun, Chen Hui, Pang Zhenshan, Cheng Zhizhong, Xue Jianling, Tao Wen, Ma Yixing, Gong Lingming, Shen Hongtao. The ore prospecting prediction model for the Huili copper orefield in Sichuan Province, China. *Nauki o Zemle i nedropol'zovanie = Earth sciences and subsoil use.* 2021;44(4):417-432. <https://doi.org/10.21285/2686-9993-2021-44-4-417-432>.

© Lin Lujun, Chen Hui, Pang Zhenshan, Cheng Zhizhong, Xue Jianling, Tao Wen, Ma Yixing, Gong Lingming, Shen Hongtao, 2021

*The article was provided by the Earth Science Frontiers journal within the framework of the agreement between the editorial boards of Irkutsk National Research Technical University (Irkutsk, Russia) and China University of Geosciences (Beijing, China) on the exchange of open access scientific papers.



Научная статья
УДК 554.041+004.94

Модель прогнозирования поисково-разведочных работ на меднорудном месторождении Хойли в провинции Сычуань, Китай*

Луцзинь Линь^a, Хуй Чэн^b, Чжэнъшань Пан^c, Чжичжун Чэн^d, Цзяньлин Сюе^e,
Вэнь Тао^f, Исин Ма^g, Линмин Гун^h, Хунтао Шэнⁱ

^aИнститут геофизических и геохимических исследований

Китайской академии геологических наук, г. Ланфан, Китай

^{b-e,g}Научно-исследовательский центр, Геологическая служба Китая, г. Пекин, Китай

^{b-g}Центр технического руководства по разведке полезных ископаемых,

Министерство природных ресурсов Китайской Народной Республики, г. Пекин, Китай

^{h,i}Сычуаньское бюро геологии и минеральных ресурсов, г. Эмэишань, Китай

Автор, ответственный за переписку: Чэн Хуй, cgschenhui@163.com

Резюме. На основе глубокого изучения 129 типичных месторождений Китая была разработана теория прогнозов и методология разведки руд и подтверждено, что это эффективный метод, особенно подходящий для начальных этапов разведки руды. В этом методе внутренние и внешние факторы металлогенеза объединяются для построения геологической модели прогноза поисковых работ, которая включает металлогеническое геологическое тело, металлогеническую структуру, металлогеническую структурную плоскость и металлогенические характеристики. Район Хойли расположен на западной окраине плиты Янцзы, где региональные металлогенические геологические условия превосходны, в связи с чем здесь сформировалась серия уникальных железно-медных месторождений. В последние годы большие успехи были достигнуты в глубоких и периферийных областях меднорудного месторождения Хойли. В статье меднорудное месторождение Хойли обсуждается в качестве типичного примера, позволяющего проиллюстрировать конкретное применение разработанного метода при поисках глубоких руд гидротермальных месторождений. Металлогеническое геологическое тело – это рудовмещающие вулканические породы (альбитит в группе Экоу), а основная металлогеническая структура и структурные плоскости представляют собой границы раздела между основными (средними) вулканическими породами, осадочными породами и возможным вулканическим жерлом. В сочетании с обзором металлогенических характеристик авторы построили геологическую модель для разведки руд на меднорудном месторождении Хойли.

Ключевые слова: модель прогноза поисково-разведочных работ, разведка полезных ископаемых, меднорудное месторождение Хойли, вулканогенные месторождения массивных сульфидных руд

Финансирование: исследование выполнено при поддержке Национальной ключевой программы исследований и разработок Китая (2017YFC0601506), Национального фонда естественных наук (42002102) и Проекта геологической разведки Китайской геологической службы (DD20190570). Авторы выражают благодарность Тяньчжу Е за руководство на протяжении всего исследования.

Для цитирования: Линь Луцзинь, Чэн Хуй, Пан Чжэнъшань, Чэн Чжичжун, Сюе Цзяньлин, Тао Вэнь, Ма Исин, Гун Линмин, Шэн Хунтао. Модель прогнозирования поисково-разведочных работ на меднорудном месторождении Хойли в провинции Сычуань, Китай // Науки о Земле и недропользование. 2021. Т. 44. № 4. С. 417–432. <https://doi.org/10.21285/2686-9993-2021-44-4-417-432>.

Introduction

Since the 21st century, with ore prospecting turning deep, the orientation prognosis of deeply concealed orebody has turned to be the scientific frontier of current ore prospecting and prediction worldwide, and it is also one of the main difficulties and hot research topics in the fields of deposit exploration and mineral deposits. Over the

years, many domestic experts and scholars have proposed various metallogenetic prediction theories and methods. Here are some representative ones. (1) There are similar analogy and geological anomaly theories [1–5]. According to natural theories and laws, it is considered that similar geological environments and metallogenetic conditions could form similar deposits. (2) Deposit

* Статья была представлена редакцией журнала Earth Science Frontiers в рамках соглашения между редакциями Иркутского национального исследовательского технического университета (г. Иркутск, Россия) и Китайского университета геологических наук (г. Пекин, Китай) об обмене научными статьями открытого доступа.



metallogenic series theory [6–8]. This theory mainly focuses on a group of deposit type combinations whose formation time, location, and genesis are closely related under the dominant geological mineralization in a specific geological period and geological environment. (3) Metallogenic system theory [9]. It organically combines the tectonic system, fluid system, chemical reaction, and deposit localization mechanism. It analyzes all the geological elements and the metallogenic process that control the formation, variation, and preservation of the deposit and the integration of the deposit series and anomaly series in terms of the dynamic evolution of mineralization. (4) Ore deposit model theory [10]. It conducts genetic model research for different minerals and ore deposit types and uses the genetic model of known deposits to carry out the metallogenic prediction and guide prospecting and exploration in unknown areas. (5) Prospecting prediction theory and methodology in exploration area [11–13]. Since the beginning of the 21st century, through implementing the national crisis mine prospecting project, especially the in-depth study of 129 representative deposits over five years, the scientific research team headed by Professor Ye Tianzhu, has made great efforts in theory and method of large-scale prospecting prediction. Combining the theories of geochemistry, mineralogy, and mineral deposit with the examples of major types of mineral deposits, a framework of exploration-area prospecting prediction theory and methodology is successfully constructed. Starting from combining internal factors (geochemical characteristics of elements) and the external factors (types of geological processes) of mineralization, a geological model of prospecting prediction is constructed, mainly composed of a metallogenic geological body metallogenic structure, metallogenic structural plane, and metallogenic characteristics. This method-technology system is supported by geochemistry theory, mineral deposit theory, element geochemistry experiment data, and mineral experiment data and formed based on many typical deposit research data and exploration project practice verification. It is an effective method especially suitable for initial prospecting and exploration. Summarizing and integrating the achievements obtained, they compiled the Prospecting

Prediction Theory and Methodology in Exploration Area [12, 13], which systematically summarized the fundamental prospecting prediction theories, and initially established prospecting prediction models for China's 25 main deposit types. This method has been tested in practice and preliminarily solved the critical problem of mineral exploration. Located in the western margin of the Yangtze Plate, the Huili area of Sichuan Province has superior metallogenic geological conditions, and formed a series of unique iron-copper deposits. In recent years, using the prospecting prediction theory and methodology in exploration area, major prospecting breakthroughs and progress have been achieved in the deep and periphery of the Huili copper orefield. Here taking it as a typical example, we expound the prospecting prediction theory and methodology and its application process in order to start further research and discussion on improving the success rate of deep prospecting.

Regional geology

The Huili area is located in the middle section of the SN-trending Sichuan – Yunnan passive continental margin rift system in the western margin of the Yangtze Plate (Fig. 1, a). This rift system is more than 1200 km long from north to south and about 150–250 km wide from east to west. The northern section extends in a NE-SW direction. It lies between the Longmenshan fault (Beichuan – Yingxiu) and the Longquanshan fault on the west side of the central Sichuan continental core. The middle section (Xichang area) and southern section (central Yunnan area) situated between the Anninghe – Lvzhijiang fault, the Leibo fault, and Xiaojiang fault extends in SN direction, with some areas crossing the Xiaojiang fault eastward to the Liupanshui fault zone in western Guizhou [14].

Except for the Ordovician and Carboniferous strata, the strata ranging from Paleoproterozoic to Cenozoic are distributed, especially the Proterozoic and Mesozoic strata. The regional strata mainly consist of Pre-Sinian, Sinian to Silurian, Permian, Triassic to Cretaceous, and Cenozoic. Among them, the pre-Sinian Hekou Group is the main copper-bearing horizon in this region (Fig. 1, b). The Hekou Group is a marine volcanic sedimentary rock series deposited in a continental

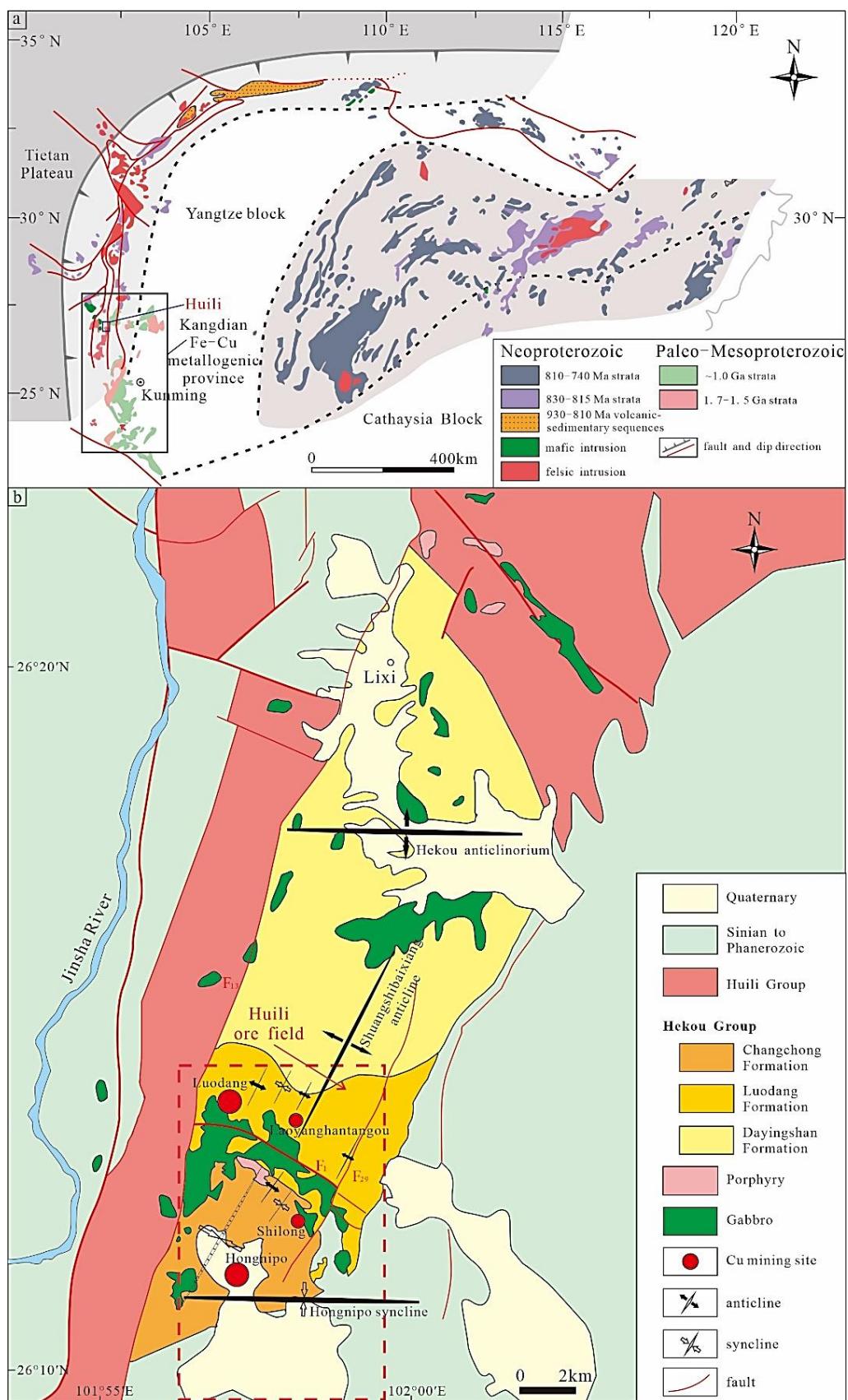


Fig. 1 Geotectonic location of the Huili area (modified from [20]) (a);
Geological sketch map of the Huili orefield (modified from [21]) (b)

Рис. 1. Геометоническое положение района Хойли (по источнику [20] с изменениями) (а)
и геологическая схематическая карта рудного поля Хойли (по источнику [21] с изменениями) (б)



margin rift environment. According to its eruption characteristics, it can be divided into three tectonic cycles, namely, Dayingshan Formation, Luodang Formation, and Changchong Formation, which are composed of a series of metamorphic clastic rocks and volcanic rocks. Previous geochronology studies show that the Hekou Group was formed in the early Proterozoic (ca. 1700 Ma: [15–19]). The magmatic activity in this region is intense and has the characteristics of multi-cycle and multi-period, including the Jining, Chengjiang, Variscan, and Indosinian periods. A series of anticlinoria, synclinoria, and thrust faults dominated by EW orientation followed by SN strike were formed due to the superposition of different periods and different types of tectonic events since the Huili period. Therefore, this region has a double-layer structure, with the lower layer forming the lower fold basement and developing the EW-striking fold and the upper layer constituting the upper fold basement and developing the SN-striking fold.

Deposit geology

The Huili copper orefield is located in Huili County, Sichuan Province. It is an essential large copper deposit in SW China and is the most extensive copper production base in Sichuan Province. Structurally, it lies on the west side of the southern part of the secondary Shuangshibaixiang anticline, which belongs to the southern limb of the Hekou anticlinorium (Fig. 1, b). In the past decades, more than ten major ore deposits (spots) have been discovered, including two large deposits (Luodang and Hongnipo), two medium-sized deposits (Shilong and Laoyanghantangou), with the rest of small deposits and spots. The cumulative proven copper resources of this orefield reach 1.74 million tons.

The Paleoproterozoic Hekou Group, Mesoproterozoic Huili Group, and Triassic Baiguowan Formation are widespread in this region. The bottom of the Hekou Group is intruded extensively by gabbro, and no underlying strata are seen. The Tongan Formation of the Huili Group is exposed in the west of the region and is in fault contact with the Hekou Group. The Baiguowan Formation is predominantly distributed in the southern part of the mining district, with sporadic distribution in the northwest corner of the district. They

are controlled by SN-trending fault and are unconformable with the underlying Hekou Group. The Hekou Group is a set of volcanic-sedimentary metamorphic rocks, the main ore-bearing formation in this area. Based on the formation characteristics, it can be divided into three different volcanic eruption-sedimentary cycles. Each cycle starts with normal deposition and ends with the end of volcanic eruption deposition. The earliest volcanic eruptions were mainly potassic, rich in potassium and poor in sodium, including potassium feldspar quartz granulite and potassium feldspar-bearing quartz albitite. The last volcanic eruption contains more sodium but less potassium, such as albite granulite and quartz albitite. All volcanic eruptions show in the three cycles of the formation the characteristics of underdeveloped agglomerates. That indicates that the volcanic eruptions in this area are dominated by a relatively quiet fissure-type eruption, which is consistent with the fact that volcanic rocks distribute alongside the F₁. Huili orefield is located between the regional nearly SN-trending F₁₃ and F₂₉. F₁₃ is a reverse fault, striking 10–20° NE and dipping 70–85°. Its hanging wall has the nature of shifting northward. F₂₉ is also a reverse fault, with strike of 30° NE and a decreasing dip angle from 70–85° on surface to 30–40° in the deep. Between F₁₃ and F₂₉, the gentle Shuangshibaixiang anticline and the Hongnipo syncline have similar orientation of 20° NE, and are separated by nearly EW-striking F₁. The east and west ends of F₁ are restricted by F₁₃ and F₂₇, respectively, with a strike of 60–80°, a fracture width of 10–30 m and a maximum vertical fault distance of 325 m. It has the nature of reverse fault in the early period, and the nature of normal fault in the later period. The strata of the west limb of the Shuangshibaixiang anticline incline to the southwest, dipping 30–40°, while the strata of the east limb of it incline to the southeast, dipping 30–40°. The southern part of the Shuangshibaixiang anticline comprises a series of small anticlines and synclines, mainly including Luodang anticline, Laoyanghantangou syncline, Laohushan anticline, Xiaochang syncline, Zhaiziqing anticline from west to east. To the eastern part of the Hongnipo syncline, there are the small Xinlaochang anticline and Shilong syncline (Fig. 1, b).



The magmatic activity is intense and widely distributed in Huili orefield. The Hekou volcanic rocks constitute the ore-bearing horizon of this district. The intrusive rocks exposed here are mainly gabbro, followed by basic dyke rocks, intrusive breccias, etc. Gabbro is a basic intrusion that is widely exposed in this area. There are more than a dozen gabbro rock masses, dykes, and sills here. Gabbro swarm is dark green, with fiber columnar, gabbro, diabasic textures, and a massive structure. Its distribution is mainly controlled by faults. The gabbro intruded along with F_1 and the intersection of F_1 and F_{13} and was exposed in the area of Luodang – Laohushan – Laoyanghantangou – Shilong (Fig. 1, b). Granite porphyry is relatively rare in the vicinity of the mining district. It is light flesh red, with a holocrystalline porphyritic texture. The fissure caused by stress is filled with quartz veins. Besides, many late dykes within the mining area, including diabase, diorite, and lamprophyre, with thickness ranging from tens of centimeters to several meters. They are widely distributed, controlled by faults, joints, and fissures. Moreover, it is worth noting that they are obliquely interspersed with stratification, crosscut, and destroy orebodies.

The Luodang deposit is located in the area constrained by Laoyatian in the west, Sirentai-qiao in the east, Shaofangliangzi in the north, and Lantianwan F_1 in the south. Copper orebodies mainly occur in the upper and middle part of the Luodang Formation, with the economic ones primarily hosted in quartz albitite and biotite quartz schist. The upper ore-bearing section is mainly distributed in the axis of the Huili syncline, where the Luodang orebody occurs. The ore-bearing rocks are mainly interbedded biotite quartz schist and quartz albitite. The copper reserves in this section account for more than 50 % of the entire mining district. The middle ore-bearing section is widely distributed in the district. However, no economic copper orebody has been discovered. The ore-hosting rock is dominated by thick gray massive quartz albitite with a small amount of muscovite quartz schist. The ore-bearing rocks in the lower section consist of abundant garnet biotite schist and minor quartz albitite, and mica schist. They are gray with palimpsest texture and massive structure. There are only a few surface outcrops of copper orebodies in the Luodang

deposit, and most of them are concealed or semi-concealed. Whereas. The orebodies in this block have relatively good stability and extensibility, distributing within an area of 1900 m long from east to west and 900 m wide from north to south. There are 32 orebodies in this block, four of which are longer than 1000 m. The thickness of them ranges from 3 to 20 m. The scale of them varies greatly, extending from 80 to 1960 m in a strike, from 43 to 525 m of the average single orebody in inclination, and from 1.6 to 30.71 m in average vertical thickness (Fig. 2). In addition, these orebodies show obvious expansion, contraction, and cross compound phenomena. Ore mineralization is relatively uniform in this block. The copper grade is general 0.67–1.26 %, with an average of about 0.9 %.

Construction of the geological model of prospecting prediction

The genetic type of the Huili orefield. Study on the Huili orefield began in the early 1990s. Since then, a lot of research has been carried out in terms of deposit geology, geochemistry, diagenesis and mineralization age, ore-forming fluids, and ore-forming material sources [15, 18, 19, 23–38]. In the beginning, most researchers proposed that the Huili copper deposit is a VMS-type deposit on the basis of being syngenetic with the marine volcanic hosting strata, stratiform and stratoid orebodies, abundant strata-bound sulfide minerals, sulfur and lead isotope showing ore-forming materials derived from the Hekou Group [22, 27, 28]. Some researchers also suggested that the Jinning movement and diabase emplacement might have promoted the reactivation and enrichment of metallogenic elements [30, 39]. Besides, since 2000, some scholars have put forward that the Huili copper orefield is an IOCG deposit based on the evidence of strong albitization, large amounts of Ti-poor magnetite and enrichment of Co, Au, P, F, REE, etc. Subsequently, much more attention has been paid to the possible IOCG properties of the Huili orefield. To date, numerous studies have shown that the Huili orefield possesses the characteristics of representative IOCG deposit, including extension environment of intraplate rift, magmatic and stratigraphic sources of ore-forming fluids, and materials [32], extensively pervasive Na, Na-Ca and K

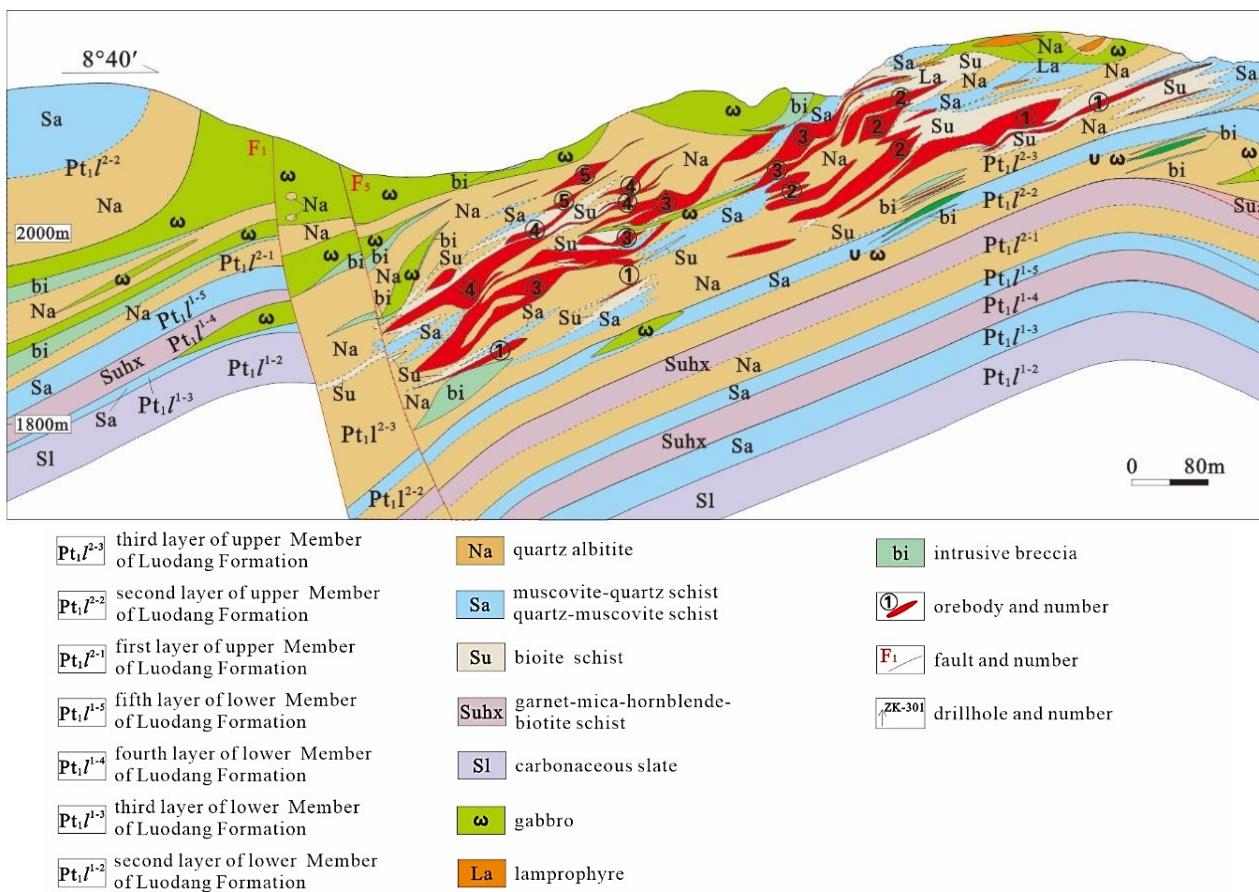


Fig. 2. Cross section VIII of the Luodang district (modified from [22])
 Рис. 2. Поперечный разрез VIII района Луодан (по источнику [22] с изменениями)

alteration characteristics¹, and multi-stage nature of mineralization² [18, 19, 29, 32, 33, 35, 36].

Determination of metallogenic geological body. The metallogenic geological body refers to the physical carrier of the mineralization process that forms the major minerals, up to industrial grade, in the main ore-forming stage. It consists of geological formation and forming environment, and also refers to natural rock assemblage and rock-controlling structure, and is closely related to the formation of the deposit in terms of time, space, and genesis [13, 40]. Therefore, only when it is clearly defined can the spatial location of deep and peripheral blind deposits and / or ore-bodies be predicted more accurately, which will provide significant guidance for further prospecting and exploration.

Temporal and spatial relationship between metallogenic geological body and ore deposits:

Temporally, the formation ages of ore-bearing volcanic rocks and orebodies are ca. 1.68 Ma and ca. 1.67 Ma, respectively, indicating mineralization is roughly coeval with diagenesis. Spatially, it is found that orebodies are often concomitant with volcanic rocks. They are hosted either in the volcanic rocks or in the sedimentary rocks near the contact zone between the two (Fig. 2).

Material source relationship between metallogenetic geological body and ore deposits: The chondrite-normalized REE patterns for pyrite from banded ores are similar to those of basic (intermediate) volcanic rocks. Sulfur isotope studies suggest that sulfur was mainly derived from rocks mentioned above, with a contribution of seawater sulfates. The initial $^{87}\text{Sr} / {^{86}\text{Sr}}$ value is 0.712 [41], which is roughly consistent with the values (ranging from 0.71614 to 0.718937) of ore-hosting volcanic rocks at the time of mineralization.

¹ Zhu Z. Lala iron oxide copper gold deposit: metallogenetic epoch and metal sources: Ph.D. thesis. Chengdu: Chengdu University of Technology, 2011.

² Greentree M. Tectonostratigraphic analysis of the Proterozoic Kangdian iron oxide-copper province South-West China: Ph.D. thesis, Perth: University of Western Australia, 2007.



lization³, suggesting that the ore-forming materials were sourced from basic-intermediate volcanic rocks in the Hekou Group. Moreover, the sulfides have highly radiogenic lead isotopic ratios, with $^{206}\text{Pb} / ^{204}\text{Pb}$ and $^{208}\text{Pb} / ^{204}\text{Pb}$ ranging from 17.687 to 67.289 and from 36.533 to 63.573 (unpublished data), respectively, indicative of the source of volcanic rocks enriched in uranium, thorium, and radiogenic lead in the Hekou Group.

Above all, the metallogenic geological body is basic (intermediate) volcanic rock formed from the Paleoproterozoic submarine volcanic eruption and/or overflow, which provided ore-forming materials and heat energy for seawater convection.

Metallogenic structure and structural plane. The study on metallogenic structure and structural planes is aimed to determine the spatial location, distribution, morphology, occurrence of the orebodies and so on, which is of great significance for prospecting and prediction. Metallogenic structures are generally structures that are usually active at the same time as mineralization, including those that existed before mineralization and reactivated during mineralization and those that formed during mineralization. The metallogenic structural planes refer to the dominant or recessive discontinuous interfaces of petrophysical and petrochemical properties [13]. They can be divided into three types, namely, primary metallogenic structural planes, secondary metallogenic structural planes and physicochemical condition conversion planes. The first type includes lithological interfaces, geological body interfaces and structural planes formed by gravity, stress, heat and thermal fluids. The second type consists of fold, fault, joint, fissure and so on. The third type generally includes conversion interfaces of temperature, pH and Eh.

The most important metallogenic structures and structural planes are a set of primary metallogenic structural planes, referring to the lithological interfaces between basic-intermediate volcanic rocks (metamorphosed into albite) and sedimentary rocks (metamorphosed into schist). Volcanic channel facies products found in the

Luodang open pit, such as volcanic breccia and collapsed breccia indicate that here may exist a volcanic vent, which is also a primary metallogenic structural plane. As the western extension of the Baotaichang – Jiulong deep fault, F₁ controlled the distribution of ore-bearing rocks and the extension and enrichment of orebodies, and served as a channel for gabbro emplacement, suggesting that it is a syngenetic fault. In addition, the dramatically lithological change, abundant siderite and interbedded slump accumulation rocks indicate that F₂₉ is also a syngenetic fault.

Metallogenic characteristics. The process of mineralization is very complex, and its products are diverse. The characteristics that can directly indicate the spatial location of the orebody and has critical importance for prospecting prediction is referred to as metallogenic characteristics. What's more, they must be unquestionably geological facts confirmed by macro and micro means [13].

(1) The orebodies are chiefly stratiform, stratoïd and lenticular, with occurrence roughly consistent with stratigraphic bedding, showing typical strata-bound features. The ore-hosting rocks are mainly quartz albite, biotite quartz schist, muscovite quartz schist and marble (Fig. 2).

(2) Ore types include laminated, massive, brecciated and veined ores (Fig. 3, a–d). Ore minerals are mainly chalcopyrite, pyrite and magnetite, followed by molybdenite, hematite, glauconite, sphalerite, etc., with occasional native gold (Fig. 3, e–h). Gangue minerals consist mainly of quartz, calcite, albite, biotite, muscovite, chlorite, etc. Ore textures are chiefly subhedral to euhedral granular texture, metasomatic texture, poikilitic texture, cataclastic texture, with scarce exsolution texture and sieve texture. The ore structures are dominated by lamellar structure, massive structure, brecciated structure and vein structure.

(3) The laminar and massive orebodies have relatively weak alteration, which are mainly characterized by silicification, carbonation, chloritization, albitionization, biotitization, and tourmalinization (Fig. 3, i–l).

³ He D. Petrological and geochemical characteristics of the Lala copper deposit in Sichuan province: Ph.D. thesis. Guiyang: Institute of Geochemistry, Chinese Academy of Sciences, 2009.

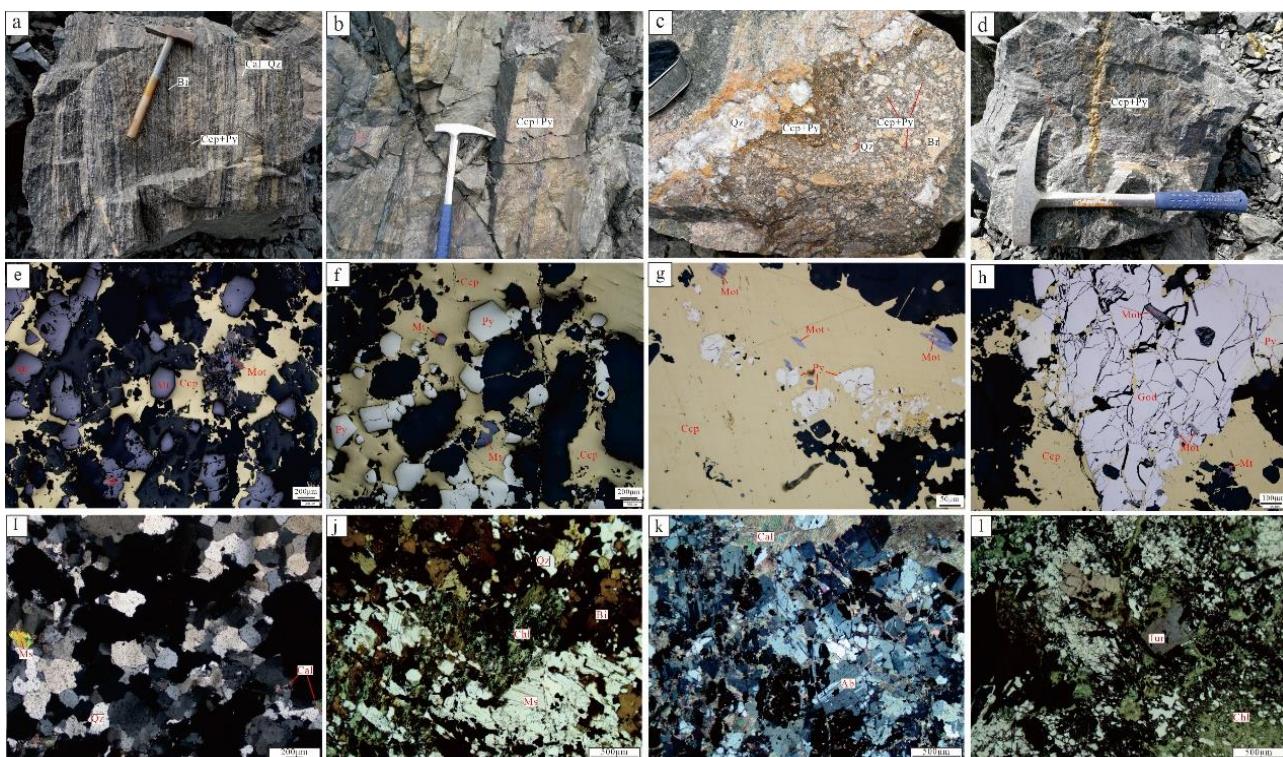


Fig. 3. Photomicrographs showing the typical metallogenic characteristics:

a – features of laminated ores, showing sulfides parallel to foliation; b – features of massive ores; c – features of brecciated ores, with sulfides cementing volcanic breccia; d – features of veined ores, showing sulfide vein filling fissures; e – subhedral to euhedral magnetite; f – subhedral to euhedral pyrite; g – molybdenite and pyrite replaced by chalcopyrite; h – cataclastic glauconodot and pyrite replaced by chalcopyrite; i – carbonation and silicification alteration; j – chloritization alteration; k – albitization alteration; l – tourmalinization alteration

Mt – magnetite; Ccp – chalcopyrite; Py – pyrite; Mot – molybdenite; God – glauconodot; Sp – sphalerite; Br – breccia; Qz – quartz; Ms – muscovite; Bt – biotite; Chl – chlorite; Cal – calcite; Ab – albite; Tur – tourmaline

Рис. 3. Микрофотографии, демонстрирующие типичные металлогенические характеристики:

а – характерные особенности слоистых руд, в которых сульфиды расположены параллельно слоистости;

б – характерные особенности массивных руд; в – характерные особенности брекчированных руд

с цементирующими вулканическую брекцию сульфидами; д – характерные особенности жильных руд,

где сульфидные прожилки заполняют трещины; е – магнетит от гипидиоморфного до идиоморфного;

ж – пирит от гипидиоморфного до идиоморфного; г – молибденит и пирит, замещенный халькопиритом;

ж – катакластический глаукоцит и пирит, замещенный халькопиритом; и – изменение карбонизации

и окварцевания; ж – изменение хлоритизации; к – изменение альбитизации; л – изменение турмалинизации

Mt – магнетит; Ccp – халькопирит; Py – пирит; Mot – молибденит; God – глаукоцит; Sp – сфалерит;

Br – брекчия; Qz – кварц; Ms – мусковит; Bt – биотит; Chl – хлорит; Cal – кальцит; Ab – альбит; Tur – турмалин

Mt – магнетит; Ccp – халькопирит; Py – пирит; Mot – молибденит; God – глаукоцит; Sp – сфалерит; Br – брекчия; Qz – кварц; Ms – мусковит; Bt – биотит; Chl – хлорит; Cal – кальцит; Ab – альбит; Tur – турмалин

Prospecting prediction geological model.

Guided by the prospecting prediction theory and methodology, the prospecting prediction geological model (Fig. 4) is eventually constructed based on the determination of the metallogenic geological body, metallogenic structure, and metallogenic structural planes and summaries of the metallogenic characteristics. In the volcanic-exhalative-sedimentary period, multiple continuous volcanic eruptions brought a large number of valuable components, which are directly spilled out onto the seabed with lava flow and volcanic debris. They were then transported and accumulated into submarine basins or slopes and finally

formed the ore-bearing volcanic sedimentary formations or source beds.

Conclusions

The significant mineralization event associated with marine volcanism has been recognized in this area, corresponding to breakups of the Columbia.

The metallogenic geological body is the ore-bearing volcanic rocks (albitite in the Hekou Group). The structural planes are mainly the interfaces between basic-intermediate rocks and sedimentary rocks and possible volcanic vents, which are primary metallogenic structural planes.

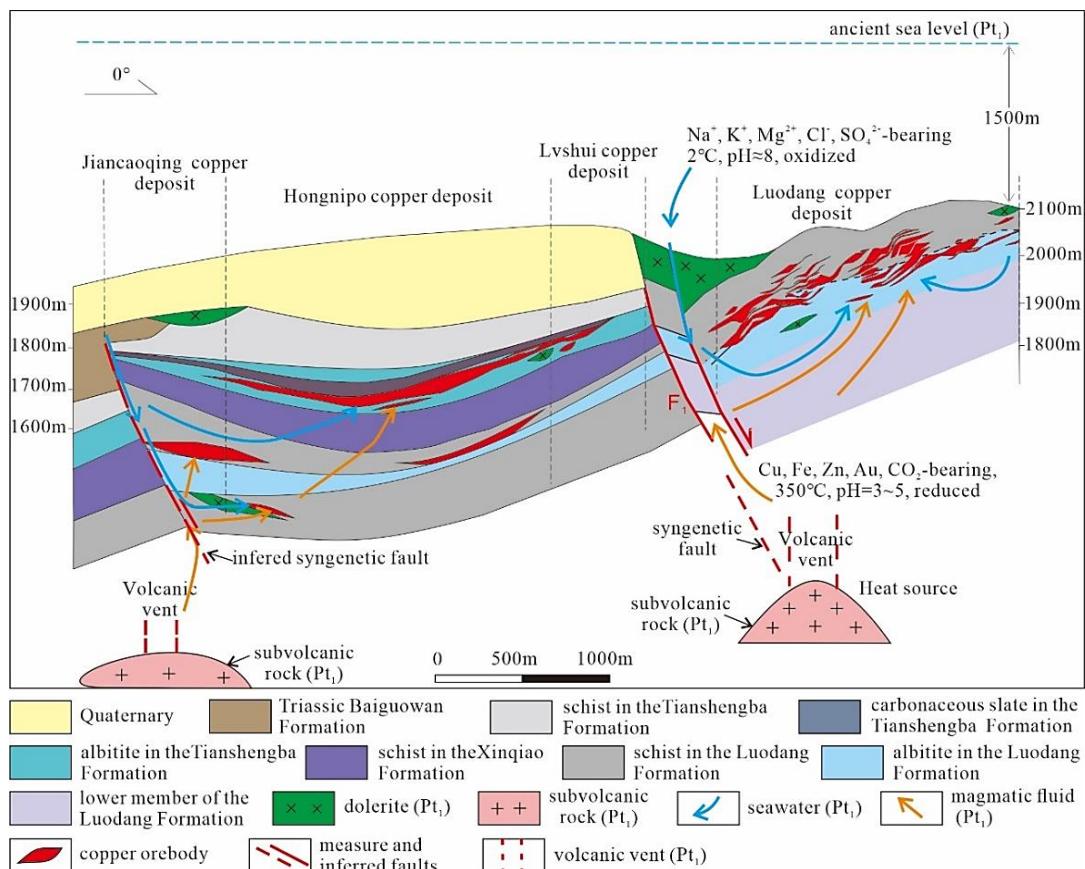


Fig. 4. Prospecting prediction geological model of the Huili orefield

Рис. 4. Прогнозно-разведочная геологическая модель рудного месторождения Хойли

After summarizing metallogenetic characteristics, the geological model of prospecting prediction in

the Huili copper exploration area has been constructed.

References

1. Zhao P., Hu W., Li Z. The theory and practices of statistical prediction for mineral deposit. *Earth Science*. 1983;22(4):107-121. (In Chinese).
2. Zhao P., Chi S. A preliminary view on geological anomaly. *Earth Science*. 1991;16(3):241-248. (In Chinese).
3. Zhao P., Meng X. Geological anomaly and mineral prediction. *Earth Science*. 1993;18(1):39-47. (In Chinese).
4. Zhao P., Wang J., Rao M., et al. Geologic anomaly of China. *Earth Science*. 1995;20(2):117-127. (In Chinese).
5. Hu W., Lu R., Gao H., et al. Method and procedure of statistical prognosis of mineral deposits. *Earth Science*. 1995;20(2):128-132. (In Chinese).
6. Cheng Y., Chen Y., Zhao Y. Preliminary discussion on the problems of mineralogic series of mineral deposits. *Acta Geoscientica Sinica*. 1979;1(1):32-58. (In Chinese).
7. Cheng Y., Chen Y., Zhao Y., et al. Further discussion on the problems of mineralogic series of mineral deposits. *Acta Geoscientica Sinica*. 1983;5(2):1-64. (In Chinese).
8. Chen Y., Pei R., Song T., et al. *Preliminary study on metallogenetic series of ore deposits in China*. Beijing: Geological Publishing House; 1998. (In Chinese).
9. Zhai Y. On the metallogenetic system. *Earth Science Frontiers*. 1999;6(1):13-27. (In Chinese).
10. Mao J., Zhang Z., Pei R. *Mineral deposits models in China*. Beijing: Geological Publishing House; 2012. (In Chinese).
11. Ye T., Xiao K., Yan G. Methodology of deposit modeling and mineral resource potential assessment using integrated geological information. *Earth Science Frontiers*. 2007;14(5):11-19. (In Chinese).
12. Ye T. Theoretical framework of methodology of deposit modeling and integrated geological information for mineral resource potential assessment. *Journal of Jilin University (Earth Science Edition)*. 2013;43(4):1053-1072. (In Chinese).
13. Ye T., Lv Z., Pang Z., et al. *Prospecting prediction theory and methodology in exploration area (general introduction)*. Beijing: Geological Publishing House; 2014. (In Chinese).
14. Liu Z., Li F., Zhong K., et al. *Tectonic evolution and mineralization of the western margin of the Yangtze Platform*. Chengdu: China Electronic Science Press; 1996. (In Chinese).



15. Greentree M., Li Z.-X. The oldest known rocks in south-western China: SHRIMP U-Pb magmatic crystallisation age and detrital provenance analysis of the Paleoproterozoic Dahongshan Group. *Journal of Asian Earth Sciences*. 2008;33(5-6):289-302. <https://doi.org/10.1016/J.JSEAES.2008.01.001>.
16. Zhao X.-F., Zhou M.-F., Li J.-W., Sun M., Gao J.-F., Sun W.-H., et al. Late Paleoproterozoic to early Mesoproterozoic Dongchuan Group in Yunnan, SW China: implications for tectonic evolution of the Yangtze Block. *Precambrian Research*. 2010;182(1-2):57-69. <https://doi.org/10.1016/j.precamres.2010.06.021>.
17. Chen W. T., Zhou M.-F., Zhao X.-F. Late Paleoproterozoic sedimentary and mafic rocks in the Hekou area, SW China: implication for the reconstruction of the Yangtze Block in Columbia. *Precambrian Research*. 2013;231:61-77. <https://doi.org/10.1016/j.precamres.2013.03.011>.
18. Zhu Z., Tan H., Liu Y., Li C. Multiple episodes of mineralization revealed by Re-Os molybdenite geochronology in the Lala Fe-Cu deposit, SW China. *Mineralium Deposita*. 2018;53(3):311-322. <https://doi.org/10.1007/s00126-017-0740-x>.
19. Zhu Z., Tan H., Liu Y. Late Palaeoproterozoic Hekou Group in Sichuan, Southwest China: geochronological framework and tectonic implications. *International Geology Review*. 2018;60(3):305-318. <https://doi.org/10.1080/00206814.2017.1333465>.
20. Zhao X.-F., Zhou M.-F. Fe-Cu deposits in the Kangdian region, SW China: a Proterozoic IOCG (iron-oxide-copper-gold) metallogenic province. *Mineralium Deposita*. 2011;46:731-747. <https://doi.org/10.1007/s00126-011-0342-y>.
21. Zhou M.-F., Zhao X.-F., Chen W. T., Li X.-C., Wang W., Yan D.-P., et al. Proterozoic Fe-Cu metallogeny and supercontinental cycles of the southwestern Yangtze Block, southern China and northern Vietnam. *Earth-Science Reviews*. 2014;139:59-82. <https://doi.org/10.1016/j.earscirev.2014.08.013>.
22. Liu D., Wang H. *Detailed exploration geological report of Luodang district in Lala deposit, Huili County, Sichuan Province*. Emeishan: Geological Team 403 of Sichuan Geological and Mineral Exploration and Development Bureau; 1982. (In Chinese).
23. Chen G.-W. Discussion on characteristics and genesis of spilite-keratoporphry series of Hekou Group in Huili area. *Acta Geologica Sichuan*. 1991;11(4):255-261. (In Chinese).
24. Chen G.-W., Cheng D., Yu X. The typomorphic feature of pyrite in the Lala copper deposit, Sichuan Province. *Mineralogy and Petrology*. 1992;12(3):85-91. (In Chinese).
25. Shentu B. Geological and geochemical characteristics and metallogenic model for the Lalachang copper deposit in Huili, Sichuan. *Sedimentary Geology and Tethyan Geology*. 1997;21:112-126. (In Chinese).
26. Jin M., Shen S. Fluid features and metallogenic conditions in Lala copper deposit, Huili, Sichuan, China. *Geological Science and Technology Information*. 1998;17(S1):46-49. (In Chinese).
27. Chen G.-W., Xia B. Study on the genesis of Lala copper deposit, Sichuan Province. *Bulletin of Mineralogy and Petrology*. 2001;20(1):42-44. (In Chinese).
28. Huang C., Bai Y., Zhu Y., et al. *Copper deposits in China*. Beijing: Geological Publishing House; 2001. (In Chinese).
29. Li Z., Wang J., Liu J., Li C., Du A., Liu Y., et al. Re-Os dating of molybdenite from Lala Fe-oxide-Cu-Au-Mo-REE deposit, Southwest China: implications for ore genesis. *Contributions to Geology and Mineral Resources Research*. 2003;18(1):39-42. (In Chinese).
30. Zhou J., Zheng R., Zhu Z., Chen J., Shen B., Li X., et al. Geochemistry and Sm-Nd dating of the gabbro in the Lala copper ore district, Sichuan Province, China. *Bulletin of Mineralogy, Petrology and Geochemistry*. 2009;28(2):111-122. (In Chinese).
31. Zhao J.-H., Zhou M.-F., Yan D.-P., Zheng J.-P., Li J.-W. Reappraisal of the ages of Neoproterozoic strata in South China: no connection with the Grenvillian orogeny. *Geology*. 2011;39(4):299-302. <https://doi.org/10.1130/G31701.1>.
32. Chen W. T., Zhou M.-F. Paragenesis, stable isotopes, and molybdenite Re-Os isotope age of the Lala iron-copper deposit, Southwest China. *Economic Geology*. 2012;107(3):459-480. <https://doi.org/10.2113/econgeo.107.3.459>.
33. Zhu Z., Sun Y. Direct Re-Os dating of chalcopyrite from the Lala IOCG deposit in the Kangdian Copper Belt, China. *Economic Geology*. 2013;108(4):871-882. <https://doi.org/10.2113/ECONGEO.108.4.871>.
34. Fang W. Geotectonic evolution and the Proterozoic iron oxide copper-gold deposits on the Western Margin of the Yangtze massif. *Geotectonica et Metallogenesis*. 2014;38(4):733-757. (In Chinese).
35. Chen W., Zhao X., Li X., Zhou M. An overview on the characteristics and origin of iron-oxide copper gold deposits in China. *Acta Petrologica Sinica*. 2019;35(1):99-118. (In Chinese). <https://doi.org/10.18654/1000-0569/2019.01.07>.
36. Chen W. T., Zhou M.-F., Li X., Gao J.-F., Bao Z., Yuan H. In situ Pb-Pb isotopic dating of sulfides from hydrothermal deposits: a case study of the Lala Fe-Cu deposit, SW China. *Mineralium Deposita*. 2019;54:671-682. <https://doi.org/10.1007/s00126-018-0833-1>.
37. Sun J., Yu W., Cui J., et al. The petrogenesis and tectonic setting of the ore-bearing mafic layered intrusions in Huili area, western Sichuan. *Journal of Geomechanics*. 2019;25(1):139-150. (In Chinese).
38. Sun J., Yu W., Tang Z., Li Z. Discovery of the ore-bearing mafic layered sill in the Lala Fe-Cu ore district, western Sichuan Province, China and its implications for petrogenesis and metallogenesis. *Earth Science Frontiers*. 2019;26(1):313-325. (In Chinese). <https://doi.org/10.13745/j.esf.yx.2017-3-54>.
39. Zhou J., Chen J., Shen B., et al. Tectono-metallogenetic mechanism for the Lala copper deposit, Sichuan. *Geotectonica et Metallogenesis*. 2008;32(1):98-104. (In Chinese).
40. Ye T., Wei C., Wang Y., et al. *Prospecting prediction theory and methodology in exploration area*. Beijing: Geological Publishing House; 2017. (In Chinese).



41. Lin L., Chen R., Pang Z., Chen H., Xue J., Jia H. Sulfide Rb-Sr, Re-Os and in situ S isotopic constraints on two mineralization events at the large Hongnipo Cu deposit,

SW China. *Minerals.* 2020;10(5):414. <https://doi.org/10.3390/min10050414>.

Список источников

1. Zhao P., Hu W., Li Z. The theory and practices of statistical prediction for mineral deposit // Earth Science. 1983. Vol. 22. Iss. 4. P. 107–121.
2. Zhao P., Chi S. A preliminary view on geological anomaly // Earth Science. 1991. Vol. 16. Iss. 3. P. 241–248.
3. Zhao P., Meng X. Geological anomaly and mineral prediction // Earth Science. 1993. Vol. 18. Iss. 1. P. 39–47.
4. Zhao P., Wang J., Rao M., et al. Geologic anomaly of China // Earth Science. 1995. Vol. 20. Iss. 2. P. 117–127.
5. Hu W., Lu R., Gao H., et al. Method and procedure of statistical prognosis of mineral deposits // Earth Science. 1995. Vol. 20. Iss. 2. P. 128–132.
6. Cheng Y., Chen Y., Zhao Y. Preliminary discussion on the problems of mineralogic series of mineral deposits // *Acta Geoscientica Sinica.* 1979. Vol. 1. Iss. 1. P. 32–58.
7. Cheng Y., Chen Y., Zhao Y., et al. Further discussion on the problems of mineralogic series of mineral deposits // *Acta Geoscientica Sinica.* 1983. Vol. 5. Iss. 2. P. 1–64.
8. Chen Y., Pei R., Song T., et al. Preliminary study on metallogenic series of ore deposits in China. Beijing: Geological Publishing House, 1998.
9. Zhai Y. On the metallogenic system // Earth Science Frontiers. 1999. Vol. 6. Iss. 1. P. 13–27.
10. Mao J., Zhang Z., Pei R. Mineral deposits models in China. Beijing: Geological Publishing House, 2012.
11. Ye T., Xiao K., Yan G. Methodology of deposit modeling and mineral resource potential assessment using integrated geological information // Earth Science Frontiers. 2007. Vol. 14. Iss. 5. P. 11–19.
12. Ye T. Theoretical framework of methodology of deposit modeling and integrated geological information for mineral resource potential assessment // Journal of Jilin University (Earth Science Edition). 2013. Vol. 43. Iss. 4. P. 1053–1072.
13. Ye T., Lv Z., Pang Z., et al. Prospecting prediction theory and methodology in exploration area (general introduction). Beijing: Geological Publishing House, 2014.
14. Liu Z., Li F., Zhong K., et al. Tectonic evolution and mineralization of the western margin of the Yangtze Platform. Chengdu: China Electronic Science Press, 1996.
15. Greentree M., Li Z.-X. The oldest known rocks in south-western China: SHRIMP U-Pb magmatic crystallisation age and detrital provenance analysis of the Paleoproterozoic Dahongshan Group // Journal of Asian Earth Sciences. 2008. Vol. 33. Iss. 5-6. P. 289–302. <https://doi.org/10.1016/J.JSEAES.2008.01.001>.
16. Zhao X.-F., Zhou M.-F., Li J.-W., Sun M., Gao J.-F., Sun W.-H., et al. Late Paleoproterozoic to early Mesoproterozoic Dongchuan Group in Yunnan, SW China: implications for tectonic evolution of the Yangtze Block // Precambrian Research. 2010. Vol. 182. Iss. 1-2. P. 57–69.
17. Chen W. T., Zhou M.-F., Zhao X.-F. Late Paleoproterozoic sedimentary and mafic rocks in the Hekou area, SW China: implication for the reconstruction of the Yangtze Block in Columbia // Precambrian Research. 2013. Vol. 231. P. 61–77. <https://doi.org/10.1016/j.precamres.2013.03.011>.
18. Zhu Z., Tan H., Liu Y., Li C. Multiple episodes of mineralization revealed by Re-Os molybdenite geochronology in the Lala Fe-Cu deposit, SW China // Mineralium Deposita. 2018. Vol. 53. Iss. 3. P. 311–322. <https://doi.org/10.1007/s00126-017-0740-x>.
19. Zhu Z., Tan H., Liu Y. Late Palaeoproterozoic Hekou Group in Sichuan, Southwest China: geochronological framework and tectonic implications // International Geology Review. 2018. Vol. 60. Iss. 3. P. 305–18. <https://doi.org/10.1080/00206814.2017.1333465>.
20. Zhao X.-F., Zhou M.-F. Fe-Cu deposits in the Kangdian region, SW China: a Proterozoic IOCG (iron-oxide-copper-gold) metallogenic province // Mineralium Deposita. 2011. Vol. 46. P. 731–747. <https://doi.org/10.1007/s00126-011-0342-y>.
21. Zhou M.-F., Zhao X.-F., Chen W. T., Li X.-C., Wang W., Yan D.-P., et al. Proterozoic Fe-Cu metallogeny and supercontinental cycles of the southwestern Yangtze Block, southern China and northern Vietnam // Earth-Science Reviews. 2014. Vol. 139. P. 59–82. <https://doi.org/10.1016/j.earscirev.2014.08.013>.
22. Liu D., Wang H. Detailed exploration geological report of Luodang district in Lala deposit, Huili County, Sichuan Province. Emeishan: Geological Team 403 of Sichuan Geological and Mineral Exploration and Development Bureau, 1982.
23. Chen G.-W. Discussion on characteristics and genesis of spilite-keratoporphry series of Hekou Group in Huili area // *Acta Geologica Sichuan.* 1991. Vol. 11. Iss. 4. P. 255–261.
24. Chen G.-W., Cheng D., Yu X. The typomorphic feature of pyrite in the Lala copper deposit, Sichuan Province // Mineralogy and Petrology. 1992. Vol. 12. Iss. 3. P. 85–91.
25. Shentu B. Geological and geochemical characteristics and metallogenic model for the Lalachang copper deposit in Huili, Sichuan // *Sedimentary Geology and Tethyan Geology.* 1997. Vol. 21. P. 112–126.
26. Jin M., Shen S. Fluid features and metallogenic conditions in Lala copper deposit, Huili, Sichuan, China // Geological Science and Technology Information. 1998. Vol. 17. Iss. S1. P. 46–49.
27. Chen G.-W., Xia B. Study on the genesis of Lala copper deposit, Sichuan Province // *Bulletin of Mineralogy Petrology and Geochemistry.* 2001. Vol. 20. Iss. 1. P. 42–44.



28. Huang C., Bai Y., Zhu Y., et al. Copper deposits in China. Beijing: Geological Publishing House, 2001.
29. Li Z., Wang J., Liu J., Li C., Du A., Liu Y., et al. Re-Os dating of molybdenite from Lala Fe-oxide-Cu-Au-Mo-REE deposit, Southwest China: implications for ore genesis // Contributions to Geology and Mineral Resources Research. 2003. Vol. 18. Iss. 1. P. 39–42.
30. Zhou J., Zheng R., Zhu Z., Chen J., Shen B., Li X., et al. Geochemistry and Sm-Nd dating of the gabbro in the Lala copper ore district, Sichuan Province, China // Bulletin of Mineralogy, Petrology and Geochemistry. 2009. Vol. 28. Iss. 2. P. 111–122.
31. Zhao J.-H., Zhou M.-F., Yan D.-P., Zheng J.-P., Li J.-W. Reappraisal of the ages of Neoproterozoic strata in South China: no connection with the Grenvillian orogeny // Geology. 2011. Vol. 39. Iss. 4. P. 299–302. <https://doi.org/10.1130/G31701.1>.
32. Chen W. T., Zhou M.-F. Paragenesis, stable isotopes, and molybdenite Re-Os isotope age of the Lala iron-copper deposit, Southwest China // Economic Geology. 2012. Vol. 107. Iss. 3. P. 459–480. <https://doi.org/10.2113/econgeo.107.3.459>.
33. Zhu Z., Sun Y. Direct Re-Os dating of chalcopyrite from the Lala IOCG deposit in the Kangdian Copper Belt, China // Economic Geology. 2013. Vol. 108. Iss. 4. P. 871–882. <https://doi.org/10.2113/ECONGEO.108.4.871>.
34. Fang W. Geotectonic evolution and the Proterozoic iron oxide copper-gold deposits on the Western Margin of the Yangtze massif // Geotectonica et Metallogenia. 2014. Vol. 38. Iss. 4. P. 733–757.
35. Chen W., Zhao X., Li X., Zhou M. An overview on the characteristics and origin of iron-oxide copper gold deposits in China // Acta Petrologica Sinica. 2019. Vol. 35. Iss. 1. P. 99–118. <https://doi.org/10.18654/1000-0569/2019.01.07>.
36. Chen W. T., Zhou M.-F., Li X., Gao J.-F., Bao Z., Yuan H. In situ Pb-Pb isotopic dating of sulfides from hydrothermal deposits: a case study of the Lala Fe-Cu deposit, SW China // Mineralium Deposita. 2019. Vol. 54. P. 671–682. <https://doi.org/10.1007/s00126-018-0833-1>.
37. Sun J., Yu W., Cui J., et al. The petrogenesis and tectonic setting of the ore-bearing mafic layered intrusions in Huili area, western Sichuan // Journal of Geomechanics. 2019. Vol. 25. Iss. 1. P. 139–150.
38. Sun J., Yu W., Tang Z., Li Z. Discovery of the ore-bearing mafic layered sill in the Lala Fe-Cu ore district, western Sichuan Province, China and its implications for petrogenesis and metallogenesis // Earth Science Frontiers. 2019. Vol. 26. Iss. 1. P. 313–325. <https://doi.org/10.13745/j.esf.yx.2017-3-54>.
39. Zhou J., Chen J., Shen B., et al. Tectono-metallogenetic mechanism for the Lala copper deposit, Sichuan // Geotectonica et Metallogenia. 2008. Vol. 32. Iss. 1. P. 98–104.
40. Ye T., Wei C., Wang Y., et al. Prospecting prediction theory and methodology in exploration area. Beijing: Geological Publishing House, 2017.
41. Lin L., Chen R., Pang Z., Chen H., Xue J., Jia H. Sulfide Rb-Sr, Re-Os and in situ S isotopic constraints on two mineralization events at the large Hongnipo Cu deposit, SW China // Minerals. 2020. Vol. 10. Iss. 5. P. 414. <https://doi.org/10.3390/min10050414>.

Information about the authors / Информация об авторах



Hui Chen, Associate research professor in Economic Geology, Ministry of Natural Resources of the People's Republic of China. He got his B.Sc.degree from Nanjing University (2009), M. Sc. from Nanjing University (2011), Ph. D. from Nanjing University (2014), Postdoctoral fellow in Economic Geology, Development and Research Center, China Geological Survey (2016). Included are in his research interests: genesis of VMS Cu-Zn and porphyry-skarn-epithermal Cu-Au-Mo; prediction for deep ore prospecting and mineral resource evaluation; use of cathodoluminescence textures and trace elements of hydrothermal quartz to map complex fluid histories.

Хуй Чэнь – научный исследователь Центра экономической геологии Министерства природных ресурсов Китайской Народной Республики. Бакалавр наук, Нанкинский университет (2009 г.), магистр наук, Нанкинский университет (2011 г.), доктор философии, Нанкинский университет (2014 г.), научный сотрудник Центра экономической геологии, развития и исследований Китайской геологической службы (2016 г.). Область научных интересов: генезис вулканогенных месторождений массивных сульфидных руд (медно-цинковые руды) и порфирово-скарново-эптермальных месторождений (медно-золото-мolibденовые руды); прогнозирование глубокой разведки руд и оценка минеральных ресурсов; использование текстур катодолюминесценции и микроэлементов гидротермального кварца для картирования сложных историй флюидов.

Lujun Lin,

Institute of Geophysical and Geochemical Exploration, Chinese Academy of Geological Sciences, Langfang, China.

Линь Луцзинь,

Институт геофизических и геохимических исследований Китайской академии геологических наук, г. Ланфан, Китай.

**Hui Chen,**

Dr. Sci. (Geol. & Mineral.), Professor,
Development Research Center,
China Geological Survey,
Beijing, China,
Technical Guidance Center for Mineral Resources Exploration,
Ministry of Natural Resources of the People's Republic of China,
Beijing, China,
cgschenhui@163.com,
<https://orcid.org/0000-0003-3108-342X>.

Чэн Хуй,

доктор геолого-минералогических наук, профессор,
Научно-исследовательский центр,
Геологическая служба Китая,
г. Пекин, Китай,
Центр технического руководства по разведке полезных ископаемых,
Министерство природных ресурсов Китайской Народной Республики,
г. Пекин, Китай,
cgschenhui@163.com,
<https://orcid.org/0000-0003-3108-342X>.

Zhenshan Pang,

Development Research Center,
China Geological Survey,
Beijing, China,
Technical Guidance Center for Mineral Resources Exploration,
Ministry of Natural Resources of the People's Republic of China,
Beijing, China.

Пан Чжэньшань,

Научно-исследовательский центр,
Геологическая служба Китая,
г. Пекин, Китай,
Центр технического руководства по разведке полезных ископаемых,
Министерство природных ресурсов Китайской Народной Республики,
г. Пекин, Китай.

Zhizhong Cheng,

Development Research Center,
China Geological Survey,
Beijing, China,
Technical Guidance Center for Mineral Resources Exploration,
Ministry of Natural Resources of the People's Republic of China,
Beijing, China.

Чэн Чжичжун,

Научно-исследовательский центр,
Геологическая служба Китая,
г. Пекин, Китай,
Центр технического руководства по разведке полезных ископаемых,
Министерство природных ресурсов Китайской Народной Республики,
г. Пекин, Китай.

Jianling Xue,

Development Research Center,
China Geological Survey,
Beijing, China,
Technical Guidance Center for Mineral Resources Exploration,
Ministry of Natural Resources of the People's Republic of China,
Beijing, China.



Сюе Цзяньлин,
Научно-исследовательский центр,
Геологическая служба Китая,
г. Пекин, Китай,
Центр технического руководства по разведке полезных ископаемых,
Министерство природных ресурсов Китайской Народной Республики,
г. Пекин, Китай.

Wen Tao,
Technical Guidance Center for Mineral Resources Exploration,
Ministry of Natural Resources of the People's Republic of China,
Beijing, China.

Тао Вэнь,
Центр технического руководства по разведке полезных ископаемых,
Министерство природных ресурсов Китайской Народной Республики,
г. Пекин, Китай.

Yixing Ma,
Development Research Center,
China Geological Survey,
Beijing, China,
Technical Guidance Center for Mineral Resources Exploration,
Ministry of Natural Resources of the People's Republic of China,
Beijing, China.

Ма Исин,
Научно-исследовательский центр,
Геологическая служба Китая,
г. Пекин, Китай,
Центр технического руководства по разведке полезных ископаемых,
Министерство природных ресурсов Китайской Народной Республики,
г. Пекин, Китай.

Lingming Gong,
403 Geological Brigade,
Sichuan Bureau of Geology and Mineral Resources,
Emeishan, China.

Гун Линмин,
403-я геологическая бригада,
Сычуаньское бюро геологии и минеральных ресурсов,
г. Эмэйшань, Китай.

Hongtao Shen,
403 Geological Brigade,
Sichuan Bureau of Geology and Mineral Resources,
Emeishan, China.

Шэнь Хунтао,
403-я геологическая бригада,
Сычуаньское бюро геологии и минеральных ресурсов,
г. Эмэйшань, 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 03.09.2021; approved after reviewing 06.10.2021; accepted for publication 12.11.2021.

Статья поступила в редакцию 03.09.2021; одобрена после рецензирования 06.10.2021; принята к публикации 12.11.2021.



РАЗВЕДКА И РАЗРАБОТКА МЕСТОРОЖДЕНИЙ ПОЛЕЗНЫХ ИСКОПАЕМЫХ

Научная статья

УДК 622.24+621.694.2

<https://doi.org/10.21285/2686-9993-2021-44-4-433-440>



Обоснование параметров наддолотного струйного насоса для вскрытия продуктивного пласта

Александр Павлович Мельников^a, Николай Александрович Буглов^b

^aГеологоразведочный техникум Иркутского национального исследовательского технического университета, г. Иркутск, Россия

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

Автор, ответственный за переписку: Мельников Александр Павлович, m1a1p@yandex.ru

Резюме. Целью представленного исследования являлась разработка наддолотного струйного насоса с учетом нестационарности низкооборотного бурения для измельчения инжектированного из затрубного пространства шлама при вскрытии продуктивного пласта. В статье предложено устройство для компоновки низа бурильной колонны, предназначенное для первичного вскрытия продуктивного пласта. В состав устройства входят наддолотный струйный насос и кольмататор. Струйный насос создает дополнительный контур циркуляции бурового раствора над забоем скважины, измельчает инжектированный из затрубного пространства шлам в камере смешения и подает его на кольмататор. Дополнительный контур циркуляции над забоем скважины, в свою очередь, создает местную депрессию пласта при сохранении гидростатического давления в скважине. Дробление шлама в камере смешения струйного насоса происходит за счет создания перекрестных потоков в струйном насосе. Перекрестные потоки обеспечиваются за счет углового и эксцентрического смешения рабочей насадки струйного насоса относительно камеры смешения. Кольмататор создает непроницаемый экран на стенке скважины для временной изоляции продуктивного пласта при первичном вскрытии. В результате исследования авторами предложены напорные характеристики струйного насоса с учетом углового, эксцентрического смешения рабочей насадки. Разработана напорная характеристика струйного насоса при нестационарном режиме работы струйного насоса в компоновке низа бурильной колонны. В напорных характеристиках учтена шероховатость проточной части струйного насоса. С помощью напорных характеристик определены допустимые смещения рабочей насадки струйного насоса. Предложены рекомендации по проектированию струйных насосов для компоновок низа бурильной колонны.

Ключевые слова: бурение, первичное вскрытие, дифференциальное давление, струйная кольматация, струйный насос, гидравлический расчет, коэффициент напора, депрессия пласта

Для цитирования: Мельников А. П., Буглов Н. А. Обоснование параметров наддолотного струйного насоса для вскрытия продуктивного пласта // Науки о Земле и недропользование. 2021. Т. 44. № 4. С. 433–440.
<https://doi.org/10.21285/2686-9993-2021-44-4-433-440>.

EXPLORATION AND DEVELOPMENT OF MINERAL DEPOSITS

Original article

Parameter substantiation of supra bit jet pump for productive formation opening

Alexander P. Melnikov^a, Nikolay A. Buglov^b

^aGeological Prospecting College, Irkutsk National Research Technical University, Irkutsk, Russia

^bIrkutsk National Research Technical University, Irkutsk, Russia

Corresponding author: Alexander P. Melnikov, m1a1p@yandex.ru

Abstract. The purpose of the study is to develop a supra bit jet pump taking into account the unsteadiness of low-speed drilling for crushing the cuttings injected from the annular space under productive formation opening. The article proposes



a device for drill string bottom assembly intended for the initial opening of the productive formation. The device includes a supra bit jet pump and a colmatator. The jet pump creates an additional circulation loop of the drilling fluid above the well bottom, crushes the cuttings injected from the annular space in the mixing chamber and delivers it to the colmatator. An additional circulation loop above the well bottom creates a local drawdown of the formation while maintaining the hydrostatic pressure in the well. Crushing of cuttings in the mixing chamber of the jet pump occurs due to the creation of cross flows in the jet pump. The cross flows are provided due to the angular and eccentric displacement of the working nozzle of the jet pump relative to the mixing chamber. The colmatator creates an impermeable screen on the borehole wall for temporary isolation of the productive formation under initial opening. The conducted study allowed the authors to propose head characteristics of the jet pump taking into account the angular, eccentric displacement of the working nozzle. The head characteristic of the jet pump has been developed for the unsteady operation of the jet pump in the drill string bottom assembly. The head characteristics take into account the roughness of the flow path of the jet pump. Using the head characteristics, the permissible displacements of the working nozzle of the jet pump have been determined. Recommendations for the design of jet pumps for drill string bottom assemblies are proposed.

Keywords: drilling, primary opening, differential pressure, jet clogging, jet pump, hydraulic calculation, head coefficient, formation drawdown

For citation: Melnikov A. P., Buglov N. A. Parameter substantiation of supra bit jet pump for productive formation opening. *Nauki o Zemle i nedropol'zovanie = Earth sciences and subsoil use*. 2021;44(4):433-440. (In Russ.). <https://doi.org/10.21285/2686-9993-2021-44-4-433-440>.

Введение

Под качественным первичным вскрытием продуктивного пласта нефтяных и газовых скважин понимают бурение всей мощности продуктивного пласта при сохранении коллекторских свойств призабойной зоны пласта. Один из наиболее прогрессивных способов вскрытия продуктивного горизонта осуществляется при бурении на депрессии одновременно с кольматированием защитного низко-проницаемого «экрана» на стенке скважины. Отрицательное дифференциальное давление позволяет минимизировать воздействие промывочного агента на продуктивный пласт, его загрязнение, существенно повысить механическую скорость бурения, создать дополнительное гидравлическое усилие на долото. Обеспечить депрессию в скважине позволяет использование в компоновке низа бурильной колонны струйного насоса. Струйные насосы находят широкое применение практически во всех областях техники во многом благодаря их простоте и надежности. Наиболее эффективно струйные насосы работают в стационарных условиях. В процессе бурения при изменении параметров гидравлической системы, переходе на нестационарный режим энергетическая эффективность (коэффициент полезного действия, коэффициент напора) струйных насосов резко падает [1–5].

К сожалению, при всей простоте конструкции, а также значительном объеме исследовательских и опытных работ струйные насосы

так и не нашли широкого внедрения в процессе бурения нефтяных и газовых скважин. Были попытки использовать струйные насосы при исследовании продуктивного пласта в бурении, в компоновке низа бурильной колонны с турбобуром для создания пульсации бурого раствора с целью повысить механическую скорость проходки скважин. Компоновки низа бурильной колонны, в состав которой входит струйный насос, позволяют снижать дифференциальное давление в скважине, что способствует их эффективному применению при бурении в интервалах поглощения бурого раствора [6–14].

Возможно применение наддолотного струйного насоса в технологии по временной изоляции продуктивного пласта путем кольматации, которая известна по работам Н. А. Шамова, Е. Г. Асеева, К. И. Халикова, А. В. Лягова и других. Струйный насос в этом случае инжектирует шлам из затрубного пространства и подает его на кольмататор, который и будет обрабатывать стенку скважины смесью бурого раствора и шлама. В этом случае струйный насос применяется для измельчения инжектированного шлама до необходимой кондиции непосредственно в самом струйном насосе, заменяя целый комплекс наземного оборудования. Идея измельчать шлам с помощью струйного насоса реализована в конструкциях забойного шламодробителя, разработанного А. В. Ляговым и Б. З. Султановым [15–17].



Материалы и методы исследования

Методология представленного исследования заключалась в поэтапном изучении влияния смещений рабочей насадки относительно камеры смешения, шероховатости проточной части камеры смешения и диффузора, а также нестационарности на напор наддолотного струйного насоса.

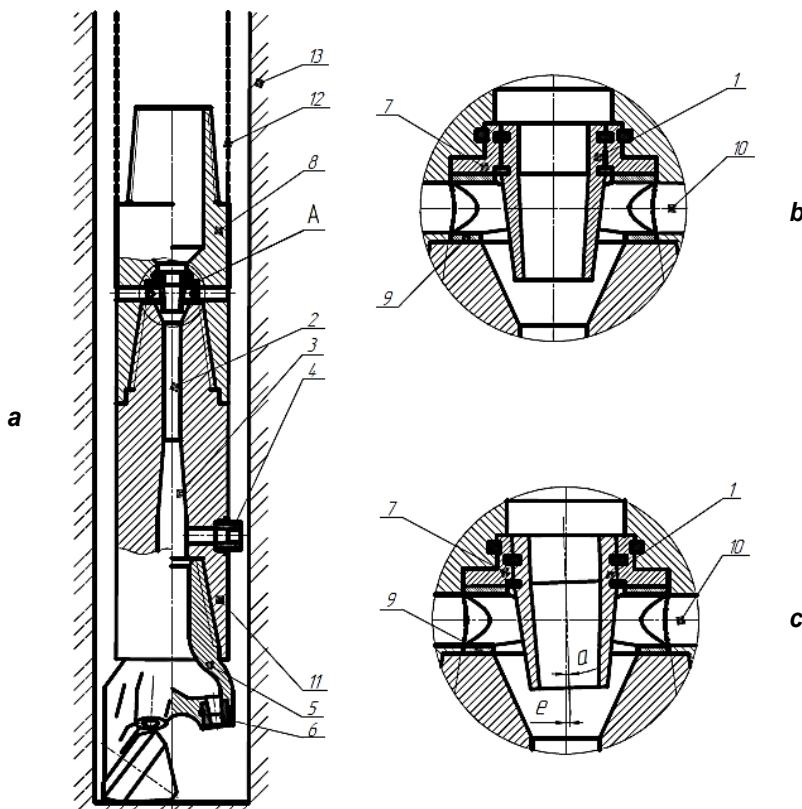
Поставленные задачи решены аналитически при помощи известных и самостоятельно разработанных методик моделирования нестационарной работы струйного насоса в компоновке низа бурильной колонны. Решение этих задач базируется на таких методах научных исследований, как математическое моделирование динамики работы наддолотного струйного насоса, а также физическое экспе-

риментальное моделирование работы струйного насоса на лабораторном стенде.

Результаты исследования и их обсуждение

На рисунке изображена конструкция устройства для первичного вскрытия продуктивного пласта [18]. Устройство для бурения скважин представляет собой струйный насос, установленный над гидромониторным долотом. На выходе из струйного насоса установлен кольмататор.

Устройство для бурения работает следующим образом. По каналу бурильных труб буровой раствор подается на рабочую насадку струйного насоса 1. За счет кинетической энергии рабочего потока на выходе из насадки создается разрежение, и струйный насос



Устройства для первичного вскрытия продуктивного пласта:

a – общий вид; b – вид сверху (увеличено), вариант без смещения рабочей насадки;

c – вид сверху (увеличено), вариант со смещением рабочей насадки

1 – рабочая насадка струйного насоса; 2 – камера смешения; 3 – диффузор; 4 – насадка кольмататора;

5 – шарошечное долото; 6 – гидромониторная насадка долота; 7 – втулка; 8 – ниппель; 9 – шайба;

10 – канал инъекции; 11 – корпус; 12 – бурильная колонна; 13 – стенка скважины

Devices for initial drilling-in of a productive formation

a – general view; b – top view (enlarged), option without displacement of the working nozzle;

c – top view (enlarged), option with the displaced working nozzle

1 – working nozzle of the jet pump; 2 – mixing chamber; 3 – diffuser; 4 – colmatator nozzle;

5 – cone rock bit; 6 – bit jet nozzle; 7 – bushing; 8 – nipple; 9 – washer;

10 – injection channel; 11 – case; 12 – drill string; 13 – borehole wall



инжектирует буровой раствор со шламом из затрубного пространства. После этого происходит смешение рабочего и инжектированного потоков в камере смешения 2, смешанный поток поступает в диффузор 3. На выходе из струйного насоса происходит разделение потоков. Главный поток поступает в гидравлическую систему долота 5 для дальнейшей очистки забоя и создания гидромониторного эффекта. Другая часть потока поступает на насадку кольмататора 4. Поток, истекающий из кольмататора 4, воздействует на стенку скважины, изолируя продуктивный пласт от взаимодействия с технологической средой в скважине. Это препятствует как фильтрации бурового раствора, так и поступлению пластового флюида в скважину при депрессии пласта.

Измельчение инжектированного из затрубного пространства шлама дроблением о стенки камеры смешения струйного насоса происходит за счет создания перекрестных

$$\bar{h} = \varphi_1^2 \frac{f_{P2} \cos^2 \alpha}{f_c} \left[2\varphi_2 + i^2 \frac{v_i}{v_p} \frac{f_{P2}}{f_c - f_{P2} \cdot \cos \alpha} \left(2\varphi_2 - \frac{1}{\varphi_4^2} \right) - (1+i)^2 \frac{v_c}{v_p} \frac{f_{P2}}{f_c} (2 - \varphi_3^2) \right],$$

где φ_1 , φ_2 , φ_3 , φ_4 – коэффициенты скорости сопла, камеры смешения, диффузора, входящего участка камеры смешения соответственно; f_{P2} – площадь поперечного сечения на выходе из рабочей насадки, м^2 ; f_c – площадь поперечного сечения камеры смешения, м^2 ; i – коэффициент инжекции; v_p , v_i , v_c – удельные объемы рабочей, инжектированной и смешанной сред соответственно, $\text{м}^3/\text{кг}$; α – угловое смещение рабочей насадки относи-

$$\bar{h} = \varphi_1^2 \frac{f_{P2}}{f_c} \left[2\varphi_2 + i^2 \left(1 + \frac{3}{2} \varepsilon^2 \right)^2 \frac{v_i}{v_p} \frac{f_{P2}}{f_i} \left(2\varphi_2 - \frac{1}{\varphi_4^2} \right) - \left(1 + i \left(1 + \frac{3}{2} \varepsilon^2 \right) \right)^2 \frac{v_c}{v_p} \frac{f_{P2}}{f_c} (2 - \varphi_3^2) \right],$$

где $\varepsilon = \frac{e}{a_0}$ – относительное эксцентрическое смещение рабочей насадки относительно камеры смешения; e – эксцентрическое смещение рабочей насадки, м ; a_0 – радиальный зазор между поверхностью рабочей струи и поверхностью камеры смешения, м .

потоков при эксцентрическом e и угловом α смещении рабочей насадки относительно оси камеры смешения. Вариант исполнения струйного насоса со смещением рабочей насадки показан на рисунке, с. При таком смещении рабочей насадки уменьшается рабочий напор струйного насоса. Также необходимо учесть влияние шероховатости проточной части струйного насоса на его напорную характеристику, чтобы определить допуски этого параметра, так как при ударе частиц шлама об стенку камеры смешения происходит износ последней.

Для создания перекрестных потоков в струйном насосе, необходимых для дробления шлама, нужно создать угловое смещение α рабочей насадки относительно оси камеры смешения. С учетом возможности этого отклонения зависимость коэффициента напора струйного насоса от коэффициента инжекции примет следующий вид [19]:

$$\bar{h} = \varphi_1^2 \frac{f_{P2}}{f_c} \left[2\varphi_2 + i^2 \left(1 + \frac{3}{2} \varepsilon^2 \right)^2 \frac{v_i}{v_p} \frac{f_{P2}}{f_i} \left(2\varphi_2 - \frac{1}{\varphi_4^2} \right) - \left(1 + i \left(1 + \frac{3}{2} \varepsilon^2 \right) \right)^2 \frac{v_c}{v_p} \frac{f_{P2}}{f_c} (2 - \varphi_3^2) \right],$$

тельно камеры смешения, рад.

Альтернативой угловому смещению α рабочей насадки для измельчения шлама в камере смешения может быть эксцентрическое смещение e рабочей насадки относительно оси камеры смешения. Зависимость коэффициента напора струйного насоса от коэффициента инжекции с учетом радиального эксцентрического смещения рабочей насадки примет вид [8]:

$$\bar{h} = \varphi_1^2 \frac{f_{P2}}{f_c} \left[2\varphi_2 + i^2 \left(1 + \frac{3}{2} \varepsilon^2 \right)^2 \frac{v_i}{v_p} \frac{f_{P2}}{f_i} \left(2\varphi_2 - \frac{1}{\varphi_4^2} \right) - \left(1 + i \left(1 + \frac{3}{2} \varepsilon^2 \right) \right)^2 \frac{v_c}{v_p} \frac{f_{P2}}{f_c} (2 - \varphi_3^2) \right],$$

При дроблении шлама о стенки камеры смешения разрушается и сама камера смешения, в этом случае увеличивается ее шероховатость R_a . Для оценки влияния шероховатости Δ проточной части на работу струйного насоса используется коэффициент скорости камеры смешения [9]:

$$\varphi_2 = \sqrt{\frac{1}{1 + 0,77 \cdot \left(\frac{\Delta}{d_2} + \frac{53,38 \cdot \eta \cdot d_2 \left(1 + \frac{0,13 \cdot \tau_0 \cdot d_2^3}{\eta \cdot Q_p (1+i)} \right)}{\rho_c \cdot Q_p (1+i)} \right)^{0,25}}},$$



где Δ – абсолютная шероховатость R_a поверхности, м; η – абсолютная вязкость, Па·с; τ_0 – динамическое напряжение сдвига, Па; ρ_c – плотность смешанного потока, кг/м³; Q_p – расход рабочей жидкости, м³/с.

$$\varphi_3 = \frac{1}{0.01375 \cdot \left(\frac{\Delta}{d_2} + \frac{53.38\eta \cdot d_2 \cdot \left(1 + \frac{0.13 \cdot \tau_0 \cdot d_2^3}{\eta \cdot Q_p(1+i)} \right)}{\rho_c \cdot Q_p(1+i)} \right)^{0.25} \cdot \left(1 - \left(\frac{d_2}{d_3} \right)^4 \right) + \sin 2a_3 \cdot \left(1 - \left(\frac{d_2}{d_3} \right)^2 \right)^2},$$

где a_3 – угол расширения в диффузоре, рад; $n = \left(\frac{d_3}{d_2} \right)^2$ – расширение диффузора; d_3 – диаметр на выходе из диффузора, м; d_2 – диаметр камеры смешения, м.

При работе над долотом на струйный насос воздействуют продольные колебания бурильной колонны, причиной которых являются грунтовые колебания. Также вследствие

Чтобы оценить влияние шероховатости Δ проточной части диффузора на напор струйного насоса, используют коэффициент скорости диффузора [20]:

конструктивных особенностей буровых насосов рабочий поток струйного насоса неравномерен. Все эти факторы являются причиной нестационарности струйного насоса. Зависимость коэффициента напора струйного насоса от коэффициента инжекции с учетом неравномерной подачи бурового насоса и продольных колебаний бурильной колонны будет выглядеть следующим образом [21]:

$$\bar{h} = \frac{\varphi_1^2}{K_{CH}} \left[2\varphi_2 + \left(\frac{q}{1 + (m-1) \sin(\omega_1 t) + \frac{(f_{BK,B} - f_{P2}) A_2 \omega_2 \cos(\omega_2 t)}{Q_{CP}}} \right)^2 \frac{v_p}{v_i} \frac{\left(2\varphi_2 - \frac{1}{\varphi_4^2} \right)}{K_{CH} - 1} - \left(1 + \frac{q}{1 + (m-1) \sin(\omega_1 t) + \frac{(f_{BK,B} - f_{P2}) A_2 \omega_2 \cos(\omega_2 t)}{Q_{CP}}} \right)^2 \frac{v_p}{v_i} \frac{2 - \varphi_3^2}{K_{CH}} \right],$$

где t – неравномерность подачи бурового насоса; q – объемный коэффициент инжекции в стационарном режиме работы струйного насоса; $\omega_1 = \frac{\pi n_1}{30}$ – угловая скорость гармонического колебания, вызванная неравномерностью подачи бурового насоса, рад/с; n_1 – частота хода поршня или плунжера бурового насоса, об/мин; t – время колебания, с; $f_{BK,B}$ – площадь сечения гладкой части канала бурильных труб, м²; f_{P2} – площадь сечения на выходе из рабочей насадки струйного насоса, м²; Q_{CP} – средняя подача буровых насосов, м³/с; $K_{CH} = \left(\frac{d_2}{d_1} \right)^2$ – основное геометрическое соотношение струйного насоса; d_1 – диаметр рабочей насадки, м; A_2 – амплитуда колебаний долота по забою скважины, м; ω_2 – угловая скорость грунтовых колебаний шарошечного долота по забою скважины, вызванная взаимодействием вооружения долота с забоем скважины, рад/с.

При анализе последней приведенной нами зависимости установлено, что неравномерность напора струйного насоса увеличивается при росте коэффициента инжекции. Неравномерность напора может достигать 70 %.

Наиболее стабильная работа струйного насоса в нестационарном режиме наблюдается при низких значениях коэффициента инжекции, то есть $q \leq 0.5$. Далее будем рассматривать струйные насосы с $K_{CH} < 4$, так как рекомендуется значение $K_{CH} = 3.9 \cdot q$.

В результате моделирования было установлено, что потери напора при угловом смещении рабочей насадки относительно камеры смешения до 7° не превышают 2 %.

Кроме того, установлено, что потери напора струйного насоса при эксцентрическом смещении рабочей насадки на 20 % относительно максимального зазора (при условии концентрического расположения рабочей насадки) не превышают 1 %.



Заключение

Предложенное устройство для первичного вскрытия продуктивного пласта с усовершенствованным струйным насосом позволяет временно изолировать продуктивный пласт при бурении на депрессии, а также улучшает процесс очистки забоя от шлама. За счет эксцентрического и углового смещения рабочей насадки относительно камеры смешения обеспечивается дробление шлама в струйном насосе. Устройство создает контур циркуляции бурового раствора над забоем скважины и за счет этого локальную депрессию над забоем скважины.

С помощью математического анализа напорных характеристик струйного насоса удалось определить угловое (до 7°) и эксцентрическое (до 20 %) смещение рабочей насадки относительно оси камеры смешения, которое не будет существенно влиять на напор струйного насоса.

Разработанные напорные характеристики струйного насоса позволяют определять рабочие параметры струйного насоса для нестационарных условий его работы. За счет простоты конструкции, отсутствия подвижных элементов, компактности и высокой надежности струйного насоса возможно обеспечивать различные технологичные решения для первичного вскрытия продуктивных пластов.

Список источников

1. Okoro E. E., Obomanu T., Sanni S. E., Olatunji D. I., Igbedion P. Application of artificial intelligence in predicting the dynamics of bottom hole pressure for under-balanced drilling: extra tree compared with feed forward neural network model // Petroleum. 2021. <https://doi.org/10.1016/j.petlm.2021.03.001>.
2. Salehi S., Hareland G., Nygaard R. Numerical simulations of wellbore stability in under-balanced-drilling wells // Journal of Petroleum Science and Engineering. 2010. Vol. 72. Iss. 3-4. P. 229–235. <https://doi.org/10.1016/j.petrol.2010.03.022>.
3. Mikhal'chenkova A. N., Lagutkin M. G., Baranova E. Yu. Comparative analysis of vortex ejector and jet pump characteristics // Chemical and Petroleum Engineering. 2020. Vol. 56. Iss. 7-8. P. 522–528. <https://doi.org/10.1007/s10556-020-00827-3>.
4. Pugh T., Khelifa C. B., Fraser K. First ever sub-sea hydraulic jet pump system used to optimize single well development offshore Tunisia // Offshore Mediterranean Conference and Exhibition. Ravenna, 2015. [Электронный ресурс]. URL: <https://www.onepetro.org/download/conference-paper/OMC-2015-207?id=conference-paper%2FOMC-2015-207> (20.08.2021).
5. Соколов Е. Я., Зингер Н. М. Струйные аппараты. М.: Энергоатомиздат, 1989. 325 с.
6. Sazonov Yu. A., Mokhov M. A., Gryaznova I. V., Tumanyan K. A., Pyatibratov P. V., Voronova V. V. Development and research of jet pump-compressor unit with periodical connection of ejector // Journal of Applied Engineering Science. 2020. Vol. 18. Iss. 2. P. 267–272. <https://doi.org/10.5937/jaes18-25998>.
7. Калачев В. В. Струйные насосы: теория, расчет и проектирование. М.: Омега-Л, 2017. 418 с.
8. Шайдаков В. В., Мельников А. П., Чернова К. В., Коробков Г. Е. Эффективное вскрытие продуктивного пласта при бурении нефтяных и газовых скважин // SOCAR Proceedings. 2018. № 4. С. 26–34. <https://doi.org/10.5510/OGP20180400368>.
9. Сазонов Ю. А., Мохов М. А., Грязнова И. В., Воронова В. В., Туманян Х. А., Франков М. А. [и др.]. Разработка перспективных технологий с применением эжекторных систем и сетчатых турбин // Труды Российского государственного университета нефти и газа имени И. М. Губкина. 2020. № 4. С. 49–60. [https://doi.org/10.33285/2073-9028-2020-4\(301\)-49-60](https://doi.org/10.33285/2073-9028-2020-4(301)-49-60).
10. Крыжанивский Е. И., Паневник Д. А. Повышение эффективности использования наддолотных струйных насосов // SOCAR Proceedings. 2020. № 2. С. 112–118. <https://doi.org/10.5510/OGP20200200437>.
11. Паневник А. В., Концур И. Ф., Паневник Д. А. Определение эксплуатационных параметров наддолотной эжекторной компоновки // Нефтяное хозяйство. 2018. № 3. С. 70–73. <https://doi.org/10.24887/0028-2448-2018-3-70-73>.
12. Паневник Д. А., Паневник А. В. Исследование совместной работы струйного и плунжерного насосов с балансирным кривошипно-шатунным приводом // Нефтяное хозяйство. 2020. № 2. С. 58–61. <https://doi.org/10.24887/0028-2448-2020-2-58-61>.
13. Крысин Н. И., Крапивина Т. Н. Повышение скоростей бурения и дебитов скважин. Разработка и совершенствование составов буровых растворов, технологий и технических средств первичного и вторичного вскрытия продуктивных пластов. М.: Инфра-Инженерия, 2018. 340 с.
14. Сазонов Ю. А., Мохов М. А., Туманян Х. А., Франков М. А., Азарин К. И. Разработка компрессорных технологий с эжекторами высокого давления для добычи нефти и газа // Нефтяное хозяйство. 2018. № 5. С. 78–82. <https://doi.org/10.24887/0028-2448-2018-5-78-82>.
15. Асеев Е. Г., Шамов Н. А., Лягов А. В., Назаров С. В., Халиков К. И., Зинатуллина Э. Я. Депрессионно-волновые и иные средства повышения приемистости и продуктивности скважин // Проектирование и эксплуатация нефтегазового оборудования: проблемы и решения: материалы Всерос. науч.-техн. конф. Уфа: Изд-во УГНТУ, 2004. С. 8–13.



16. Андуганов А. А., Лягов А. В., Агзамов Ф. А. Разработка конструкции эжекционного струйного скважинного насоса для традиционного бурения // Современные технологии в нефтегазовом деле – 2019: сборник трудов Междунар. науч.-техн. конф. Уфа: Изд-во УГНТУ, 2019. С. 15–19.
17. Касимов Д. Л., Лягов А. В. Компоновка низа бурильной колонны модернизированная // 70-я научно-техническая конференция студентов, аспирантов и молодых ученых: сборник тезисов. В 2 т. Т. 1. Уфа: Изд-во УГНТУ, 2019. С. 97–98.
18. Пат. № 186817, Российская Федерация, МПК E21B 21/00, F16F 5/00. Устройство для бурения скважин / А. П. Мельников, Н. А. Буглов, В. М. Иванишин, Р. Х. Акчурин. Заявл. 02.11.2018; опубл. 05.02.2019. Бюл. № 4.
19. Мельников А. П., Буглов Н. А. Исследование влияния эксцентрического и углового смещения рабочей насадки струйного насоса на его работу при бурении скважин // Вестник Иркутского государственного технического университета. 2016. № 6. С. 50–57. <https://doi.org/10.21285/1814-3520-2016-6-50-57>.
20. Мельников А. П., Буглов Н. А. Влияние шероховатости проточной части струйного насоса на его характеристики // Вестник Иркутского государственного технического университета. 2018. Т. 22. № 1. С. 23–29. <https://doi.org/10.21285/1814-3520-2018-1-23-29>.
21. Мельников А. П., Шайдаков В. В., Сёмин В. И. Работа струйного насоса в нестационарных условиях забоя при бурении нефтяных и газовых скважин // Строительство нефтяных и газовых скважин на суше и на море. 2018. № 12s. С. 30–35. <https://doi.org/10.30713/0130-3872-2018-12s-30-35>.

References

1. Okoro E. E., Obomanu T., Sanni S. E., Olatunji D. I., Igbinedion P. Application of artificial intelligence in predicting the dynamics of bottom hole pressure for under-balanced drilling: extra tree compared with feed forward neural network model. *Petroleum*. 2021. <https://doi.org/10.1016/j.petlm.2021.03.001>.
2. Salehi S., Hareland G., Nygaard R. Numerical simulations of wellbore stability in under-balanced-drilling wells. *Journal of Petroleum Science and Engineering*. 2010; 72(3-4):229-235. <https://doi.org/10.1016/j.petrol.2010.03.022>.
3. Mikhalkenchikova A. N., Lagutkin M. G., Baranova E. Yu. Comparative analysis of vortex ejector and jet pump characteristics. *Chemical and Petroleum Engineering*. 2020;56(7-8):522-528. <https://doi.org/10.1007/s10556-020-00827-3>.
4. Pugh T., Khelifa C. B., Fraser K. First ever sub-sea hydraulic jet pump system used to optimize single well development offshore Tunisia. In: *Offshore Mediterranean Conference and Exhibition*. Ravenna; 2015. Available from: <https://www.onepetro.org/download/conference-paper/OMC-2015-207?id=conference-paper%2FOMC-2015-207> [Accessed 20th August 2021].
5. Sokolov E. Ya., Zinger N. M. *Jet devices*. Moscow: Energoatomizdat; 1989. 325 p. (In Russ.).
6. Sazonov Yu. A., Mokhov M. A., Gryaznova I. V., Tumanyan K. A., Pyatibratov P. V., Voronova V. V. Development and research of jet pump-compressor unit with periodical connection of ejector. *Journal of Applied Engineering Science*. 2020;18(2):267-272. <https://doi.org/10.5937/jaes18-25998>.
7. Kalachev V. V. *Jet pumps: theory, calculation and design*. Moscow: Omega-L; 2017. 418 p. (In Russ.).
8. Shaidakov V. V., Melnikov A. P., Chernova K. V., Korobkov G. E. Efficient drilling-in in the oil and gas wells drilling. *SOCAR Proceedings*. 2018;4:26-34. (In Russ.). <https://doi.org/10.5510/OGP20180400368>.
9. Sazonov Yu. A., Mokhov M. A., Gryaznova I. V., Voronova V. V., Tumanyan Kh. A., Frankov M. A., et al. Development of advanced technologies dedicated to ejector systems and mesh turbines. *Trudy Rossiiskogo gosudarstvennogo universiteta nefti i gaza imeni I. M. Gubkina* = Proceedings of the Russian State University of Oil and Gas. 2020;4:49-60. (In Russ.). [https://doi.org/10.33285/2073-9028-2020-4\(301\)-49-60](https://doi.org/10.33285/2073-9028-2020-4(301)-49-60).
10. Kryzhanivskyi E. I., Panevnyk D. A. Improving use efficiency above-bit jet pumps. *SOCAR Proceedings*. 2020;2:112-118. (In Russ.). <https://doi.org/10.5510/OGP20200200437>.
11. Panevnik A. V., Kotsur I. F., Panevnik D. A. Determination of operating parameters of near-bit ejector assembly. *Neftyanoe khozyaistvo*. 2018;3:70-73. (In Russ.). <https://doi.org/10.24887/0028-2448-2018-3-70-73>.
12. Panevnyk D. A., Panevnyk A. V. Investigation of the joint work of a jet and plunger pump with a balancing crank-rod drive. *Neftyanoe khozyaistvo*. 2020;2:58-61. (In Russ.). <https://doi.org/10.24887/0028-2448-2020-2-58-61>.
13. Krysin N. I., Krapivina T. N. *Increasing drilling rates and well yield. Development and improvement of drilling fluid compositions, technologies and engineering tools of primary and secondary penetration of payout beds*. Moscow: Infra-Inzheneriya; 2018. 340 p. (In Russ.).
14. Sazonov Yu. A., Mokhov M. A., Tumanyan Kh. A., Frankov M. A., Azarin K. I. The development of compressor technologies with high pressure ejectors for oil and gas production. *Neftyanoe khozyaistvo*. 2018;5:78-82. (In Russ.). <https://doi.org/10.24887/0028-2448-2018-5-78-82>.
15. Aseev E. G., Shamov N. A., Lyagov A. V., Nazarov S. V., Khalikov K. I., Zinatullina E. Ya. Depression-wave and other means to increase well intake capacity and productivity. In: *Proektirovaniye i ekspluatatsiya neftegazovogo oborudovaniya: problemy i resheniya: materialy Vserossiiskoi nauchno-tehnicheskoi konferentsii = Design and operation of oil and gas equipment: problems and solutions: materials of the All-Russian scientific and technical conference*. Ufa: Ufa State Petroleum Technological University; 2004. p.8–13. (In Russ.).
16. Anduganov A. A., Lyagov A. V., Agzamov F. A. Developing the design of a hydraulic jet pump for traditional drilling. In: *Sovremennye tekhnologii v neftegazovom деле – 2019: sbornik trudov Mezhdunarodnoi nauchno-tehnicheskoi konferentsii = Modern technologies in oil and gas business – 2019: collected works of the International*



scientific and technical conference. Ufa: Ufa State Petroleum Technological University; 2019. p.15–19. (In Russ.).

17. Kasimov D. L., Lyagov A. V. Modernized assembly the drill string bottom. In: 70-ya nauchno-tehnicheskaya konferentsiya studentov, aspirantov i molodykh uchenykh: sbornik tezisov = 70th scientific and technical conference of students, postgraduate students and young scientists: collected abstracts. In 2 vol. Vol. 1. Ufa: Ufa State Petroleum Technological University; 2019. p.97–98. (In Russ.).

18. Mel'nikov A. P., Buglov N. A., Ivanishin V. M., Achkurin R. Kh. A device for drilling wells. Patent RF, no. 186817; 2019. (In Russ.).

19. Melnikov A. P., Buglov N. A. Studying the influence of working nozzle eccentric and angular misalignment in the jet pump on its operation at drilling wells. *Vestnik*

Irkutskogo gosudarstvennogo tekhnicheskogo universiteta = Proceedings of Irkutsk State Technical University. 2016; 6:50-57. (In Russ.). <https://doi.org/10.21285/1814-3520-2016-6-50-57>.

20. Melnikov A. P., Buglov N. A. Effect of wet end roughness on jet pump characteristics. *Vestnik Irkutskogo gosudarstvennogo tekhnicheskogo universiteta = Proceedings of Irkutsk State Technical University.* 2018;22;1:23-29. (In Russ.). <https://doi.org/10.21285/1814-3520-2018-1-23-29>.

21. Melnikov A. P., Shaidakov V. V., Syomin V. I. Jet pump operation in a bottom hole's non-stationary conditions when drilling oil and gas wells. *Stroitel'stvo neftyanykh i gazovykh skvazhin na sushe i na more.* 2018;12s:30-35. (In Russ.). <https://doi.org/10.30713/0130-3872-2018-12s-30-35>.

Информация об авторах / Information about the authors



Мельников Александр Павлович,
преподаватель,
Геологоразведочный техникум Иркутского национального
исследовательского технического университета,
г. Иркутск, Россия,
m1a1p@yandex.ru.
Alexander P. Melnikov,
Lecturer,
Geological Prospecting College,
Irkutsk National Research Technical University,
Irkutsk, Russia,
m1a1p@yandex.ru.



Буглов Николай Александрович,
кандидат технических наук, доцент,
заведующий кафедрой нефтегазового дела,
Институт недропользования,
Иркутский национальный исследовательский технический университет,
г. Иркутск, Россия,
bna@istu.edu.
Nikolay A. Buglov,
Cand. Sci. (Eng.), Associate Professor,
Head of the Department of Oil and Gas Business,
Institute of Subsurface Resource Management,
Irkutsk National Research Technical University,
Irkutsk, Russia,
bna@istu.edu.

Вклад авторов / Contribution of the authors

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

Конфликт интересов / Conflict of interests

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

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

Информация о статье / Information about the article

Статья поступила в редакцию 24.09.2021; одобрена после рецензирования 28.10.2021; принятая к публикации 30.11.2021.

The article was submitted 24.09.2021; approved after reviewing 28.10.2021; accepted for publication 30.11.2021.



Научная статья

УДК 622.271

<https://doi.org/10.21285/2686-9993-2021-44-4-441-447>



Применение усовершенствованного добычного комплекса для открытой разработки рудных месторождений

Антон Юрьевич Чебан^a

^aИнститут горного дела ДВО РАН, г. Хабаровск, Россия

Резюме. Целью данного исследования является снижение потерь минерального сырья и повышение эффективности ведения горных работ с применением добычного комплекса путем внедрения нового технико-технологического решения, расширяющего функциональные возможности оборудования. В ходе исследования проводится анализ известных конструкций выемочного оборудования, способного обеспечивать преобразование циклического процесса черпания в непрерывный процесс погрузки горной массы, а также осуществление просеивания мелких фракций из рудной массы. Перспективным направлением развития выемочного оборудования являются добычные комплексы, обеспечивающие высокую производительность работ. В статье предлагается усовершенствованная конструкция добычного комплекса, позволяющая совмещать выемочно-погрузочный процесс с сортировкой рудной массы. Усовершенствованный добычной комплекс снабжен кольцевым конвейером с виброрешетками, через которые осуществляется просеивание мелких фракций в накопитель. Из накопителя мелкие фракции посредством системы пневмотранспортирования направляются в секции бункера специального транспортного средства, а надрешетный продукт отвальным конвейером грузится в автосамосвал. Собранные в секциях бункера мелкие фракции некондиционной руды отправляются на кучное выщелачивание, а мелкие фракции кондиционной руды – на переработку на обогатительной фабрике. Предлагаемое технико-технологическое решение с применением усовершенствованного добычного комплекса обеспечит снижение себестоимости работ и повышение коэффициента извлечения минерального сырья при разработке сложноструктурных месторождений, руды которых характеризуются природным обогащением мелких классов. Удаление мелких фракций руды непосредственно во время выемочно-погрузочного процесса позволяет существенно уменьшить пыление и сократить потери минерального сырья от выдувания и просыпания мелких фракций.

Ключевые слова: экскаватор, рабочее оборудование, рудная масса, сортировка, мелкие фракции, бункер, автосамосвал

Для цитирования: Чебан А. Ю. Применение усовершенствованного добычного комплекса для открытой разработки рудных месторождений // Науки о Земле и недропользование. 2021. Т. 44. № 4. С. 441–447. <https://doi.org/10.21285/2686-9993-2021-44-4-441-447>.

Original article

Application of an improved mining complex for opencast mining of ore deposits

Anton Yu. Cheban^a

^aMining Institute, Far East Branch of the Russian Academy of Sciences, Khabarovsk, Russia

Abstract. The purpose of the study is reducing the loss of mineral raw materials and increasing the efficiency of mining operations using a mining complex through the introduction of a new design and engineering solution that improves the equipment functionality. The study involves the analysis of known designs of mining equipment capable of providing the transformation of cyclic scooping of rock mass into its continuous loading, as well as screening of fine fractions from the ore mass. High productivity mining complexes are referred to a promising direction of mining equipment development. The article proposes an improved design of the mining complex, which allows to combine the extraction and loading process and ore mass grading. The improved mining complex is equipped with an annular conveyor with vibrating grids through which fines are screened into the accumulation hopper. From the accumulation hopper the small fractions are sent by means of a pneumatic conveying system to the bunker sections of a special-purpose hauler while the oversize product is loaded into a dump truck by a dump conveyor. The fine fractions of substandard ore collected in the bunker sections are sent for heap leaching. The fine fractions of conditioned ore are sent to the concentration plant to be processed. The



proposed design and engineering solution employing an improved mining complex will reduce the cost of works and increase the recovery factor of mineral raw materials in the development of complex-structured deposits of ores characterized by natural concentration of small classes. Removal of fine ore fractions directly during the excavation and loading process can significantly reduce the dusting and decrease the loss of mineral raw materials from blowing and spilling of fine fractions.

Keywords: excavator, working equipment, ore mass, grading, fines, bunker, dump truck

For citation: Cheban A. Yu. Application of an improved mining complex for opencast mining of ore deposits. *Nauki o Zemle i nedropol'zovanie = Earth sciences and subsoil use.* 2021;44(4):441-447. (In Russ.). <https://doi.org/10.21285/2686-9993-2021-44-4-441-447>.

Введение

Потребление минерального сырья и производимой из него продукции во всем мире непрерывно возрастает. Так, добыча металлов в мире с 1987 по 2014 годы возросла в несколько раз: железа – с 502 до 1966 млн т, марганца – с 12,5 до 48,9 млн т, меди – с 6,4 до 18,2 млн т, свинца – с 2,3 до 5,6 млн т [1]. В связи с истощением запасов богатых руд добывающие предприятия вынуждены переходить на освоение месторождений или участков, имеющих более низкие содержания полезных компонентов в рудах. Применение все более мощной горной и транспортной техники, развитие научно-технического прогресса в области обогащения руд, рост цен на минеральное сырье позволили начать освоение месторождений, ранее считавшихся нерентабельными [2–6]. Таким образом, при постоянно снижающемся качестве минерального сырья и одновременном росте потребления металлов произошло резкое увеличение объемов извлекаемой рудной массы и вскрытых пород. Достижение конкурентных преимуществ за счет повышения производительности и снижения себестоимости ведения работ требует дальнейшей разработки новых технических и технологических решений с учетом принципов рационального сочетания процессов горных работ [7, 8].

Материалы и методы исследования

Рудные месторождения в основном сложены прочными горными породами, рыхление которых осуществляется с применением буровзрывных работ. При этом усовершенствованные технологии по скважинного взрывания с замедлениями в 150 мс и более обеспечивают повышение качества проработки уступа и в ряде случаев позволяют практически

исключить выход негабаритных включений, что достигается за счет многократного взрывного нагружения горного массива [9]. Выемка горной массы ведется преимущественно посредством одноковшовых экскаваторов. Повышение производительности одноковшового экскаватора за счет увеличения его размеров и вместимости ковша во многих случаях нецелесообразно, так как ведет к дополнительному разубоживанию полезного ископаемого и пересортице руд. Повысить производительность одноковшового экскаватора возможно за счет сокращения времени рабочего цикла, состоящего из черпания горной массы, поворота экскаватора к месту выгрузки и обратно, разгрузки ковша. При этом при угле поворота экскаватора 90° операция поворота к месту выгрузки и обратно составляет до 60–65 % времени всего цикла [10].

Известны конструктивные схемы одноковшовых экскаваторов, обеспечивающие преобразование циклического процесса черпания ковша в непрерывный процесс погрузки горной массы в транспортные средства. Так, в работе [11] предлагается конструкция одноковшового экскаватора, имеющего дополнительное дробильно-погрузочное оборудование, ковш осуществляет разгрузку материала в загрузочный спуск, откуда он последовательно подается на транспортеры, дробильно-сортировочный механизм, кольцевой и передаточный транспортеры. Недостатком конструкции является большое количество транспортирующих устройств, что повышает энергоемкость работ и снижает надежность конструкции. Конструктивная схема добычного комплекса на базе одноковшового экскаватора, представленная в работе [12], предполагает непосредственную разгрузку горной массы из ковша в приемный бункер с классификатором, при этом негабаритные включения



подаются на дробильную установку, далее горная масса по разгрузочному конвейеру направляется к транспортному средству – автосамосвалу или ленточному конвейеру. На ООО «Объединенные машиностроительные заводы – Горное оборудование и технологии (группа «Уралмаш – Ижора») разработана конструкция добычного комплекса ДК-2000 с теоретической производительностью не менее 2250 м³/ч на базе одноковшового экскаватора с вместимостью ковша 10 м³ [13]. Комплекс ДК-2000 снабжен кольцевым конвейером, на который происходит разгрузка горной массы из ковша с последующим ее перемещением отвальным конвейером в автомобильный или железнодорожный транспорт, параметры добычного комплекса позволяют вести выемку и погрузку горной массы с включениями крупностью до 800 мм. Проведенный разработчиками сравнительный анализ показал, что по сравнению с традиционными одноковшовыми экскаваторами применение ДК-2000 позволит на 21 % снизить стоимость оборудования, на 70 % уменьшить численность производственного персонала и на 47 % сократить годовые эксплуатационные затраты [13].

Особенностью руд цветных, редких и благородных металлов является их концентрация в минералах, имеющих размеры от первых микрометров до миллиметровых значений. При этом зерна рудных минералов в рядовых и бедных рудах тесно срастаются с хрупкими жильными минералами, поэтому при взрывной и механической дезинтеграции проявляется эффект накопления ценных компонентов в рудном отсеве. Так, на Бом-Горхонском руднике (Забайкальский край, Россия) среднее содержание трехокиси вольфрама составляет 0,65 %, а содержание полезного компонента в рудном отсеве в среднем равно 1,1 % [14]. При подземной разработке рудника «Ирокинда» (Республика Бурятия, Россия) содержания золота в теряемом рудном отсеве размером менее 6 мм составляют 7–29 г/т, что существенно превышает среднее содержание золота в руде [15]. Технологические пробы свинцово-цинковой руды забойной

крупности месторождения Учкулач (Джизакская область, Узбекистан) показали, что в руде отчетливо прослеживается тенденция обогащения свинцом мелких классов, это позволяет непосредственно на стадии грохочения выделять мелкий класс размером менее 25 мм и направлять его в концентрат как содержащий свинца в 2–3 раза больше, чем руды классов +25 мм [16].

При разработке сложноструктурных месторождений селективно извлекаются кондиционные и некондиционные руды. Первые направляются на переработку, вторые – на склад временно некондиционной руды, а по существу – в отвал. При этом некондиционные руды также содержат обогащенную ценностями компонентами рудную мелочь, которую возможно было бы включить в переработку, например с использованием технологии кучного выщелачивания. Однако включение процесса по грохочению некондиционной руды с выделением мелких фракций, а также дополнительные транспортные и перевалочные операции существенно повышают стоимость производства. Для Тырныаузского вольфрамо-молибденового комбината (Кабардино-Балкарская Республика, Россия) разработан способ формирования качества руд [17], заключающийся в выделении из потока некондиционных руд, транспортируемых из нагорного карьера по рудоскату с прорезями, наиболее обогащенных мелких фракций размером менее 5 мм, которые затем отправляются на обогащение. Фракции размером +5 мм не перерабатываются и направляются на склад временно некондиционной руды. Также известны технические решения по оснащению одноковшовых экскаваторов специальными просеивающими устройствами для отделения мелких фракций¹ [18–20], однако данное оборудование имеет невысокую производительность.

Предлагаемые в работах [11–13] конструктивные решения позволяют существенно повысить производительность выемки. Тем не менее данное оборудование не позволяет вести отделение обогащенных ценным компо-

¹ Чебан А. Ю. Совершенствование конструкции и способа применения экскаваторов с сортировочными ковшами // Науки о Земле и недропользование. 2021. Т. 44. № 1. С. 56–62. <https://doi.org/10.21285/2686-9993-2021-44-1-56-62>.



нентом мелких классов руды, кроме того, наличие рудной мелочи в рудной массе при выемочно-погрузочных работах и транспортировке приводит к пылению и потере мелких классов от выдувания и просыпания.

Целью представленного исследования является снижение потерь минерального сырья, уменьшение экологической нагрузки на окружающую среду и повышение эффективности ведения горных работ с применением добычного комплекса на базе одноковшового экскаватора путем внедрения нового технико-технологического решения, расширяющего функциональные возможности оборудования.

Результаты исследования

На основе анализа результатов проведенного исследования предлагается решение, обеспечивающее повышение эффективности работы горно-обогатительного предприятия

при открытой разработке месторождений, руды которых после дезинтеграции характеризуются обогащением мелких классов за счет выделения в забое непосредственно в процессе добывчных работ мелких классов некондиционной руды, ее последующей сортировки и переработки, а также увеличения производительности и расширения функциональности добычного оборудования.

На основании данных эксплуатационной разведки и технологического опробования формируется цифровая модель добычного блока, загружаемая в бортовую систему автоматизированного управления усовершенствованного добычного комплекса, осуществляющего селективную отработку подготовленного к выемке массива горных пород (рисунок).

С учетом положения контуров и зон локализации технологических типов горной массы добычным комплексом с рабочим оборудова-

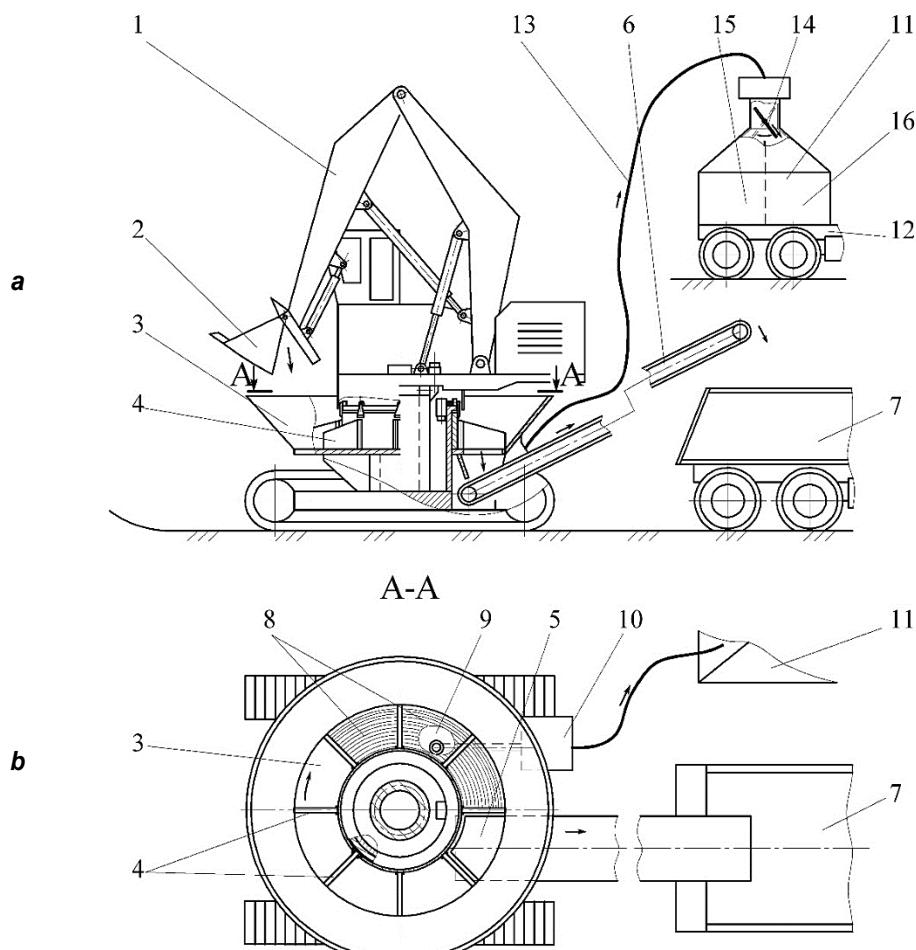


Схема усовершенствованного добычного комплекса в комплекте с транспортными средствами:

а – общий вид; б – вид сверху

Diagram of the improved mining complex completed with hauling equipment:

a – general view; b – top view



нием 1 гидравлического экскаватора типа «прямая лопата» ведется выемка. Разгрузка ковша 2 осуществляется в кольцевой конвейер 3, который посредством лопаток 4 перемещает рудную массу к разгрузочному окну 5 и сбрасывает на отвальный конвейер 6, с помощью которого ведется загрузка автосамосвала 7. При перемещении кольцевым конвейером 3 рудной массы мелкие фракции просеиваются через виброрешетки 8, собираются в накопителе 9 и посредством системы пневмотранспортирования 10 перемещаются в двухсекционный бункер 11, установленный на специальном транспортном средстве 12. При выемке некондиционной руды просеянные мелкие фракции по гибкому трубопроводу 13 через заслонку 14 направляются в секцию 15 бункера 11, при выемке кондиционной руды заслонка 14 поворачивается и мелкие фракции направляются в секцию 16. После заполнения бункера 11 мелкие фракции некондиционной руды транспортируются на кучное выщелачивание, а мелкие фракции кондиционной руды – на переработку на обогатительной фабрике. Надрешетный продукт некондиционной руды транспортируется на склад временно некондиционной руды, а кондиционная руда направляется на обогатительную фабрику.

Заключение

Предлагаемое технико-технологическое решение с применением усовершенствованного добычного комплекса обеспечит повышение коэффициента извлечения минерального сырья при разработке сложноструктурных месторождений, руды которых характеризуются природным обогащением мелких классов, за счет выделения и последующей переработки мелких фракций некондиционных руд, которые при использовании традиционных добычных технологий отправлялись бы на склад временно некондиционной руды. Удаление мелких фракций руды непосредственно во время выемочно-погрузочного процесса позволяет существенно уменьшить пыление в зоне погрузки автосамосвалов, а также сократить потери минерального сырья от выдувания и просыпания мелких фракций при погрузке и транспортировке полезного ископаемого. Данная технология обеспечивает формирование разнокачественных потоков рудной массы для раздельной переработки. Расширение функциональных возможностей добычного оборудования для внутрикарьерной первичной переработки рудной массы обеспечит снижение себестоимости работ, что позволит включать в отработку сложноструктурные участки месторождений, сложенные бедными и забалансовыми рудами.

Список источников

1. Оганесян Л. В. Экологические и технико-технологические проблемы освоения нетрадиционных источников минерального сырья // Минеральные ресурсы России. Экономика и управление. 2019. № 2. С. 48–52.
2. Espinoza R. D., Rojo J. Towards sustainable mining (Part I): valuing investment opportunities in the mining sector // Resources Policy. 2017. Vol. 52. P. 7–18. <https://doi.org/10.1016/j.resourpol.2017.01.011>.
3. Hidayah N. N., Abidin S. Z. The evolution of mineral processing in extraction of rare earth elements using liquid-liquid extraction: a review // Minerals Engineering. 2018. Vol. 121. P. 146–157. <https://doi.org/10.1016/j.mineng.2018.03.018>.
4. Jang H., Topal E., Kawamura Y. Decision support system of unplanned dilution and ore-loss in underground stoping operations using a neuro-fuzzy system // Applied Soft Computing. 2015. Vol. 32. P. 1–12. <https://doi.org/10.1016/j.asoc.2015.03.043>.
5. Чебан А.Ю. Технология разработки сложноструктурного месторождения апатитов и выемочно-сортиро-вочный комплекс для ее осуществления // Записки Горного института. 2019. Т. 238. С. 399–404. <https://doi.org/10.31897/PMI.2019.4.399>.
6. Smith S. R., Zhou C., Baron J. Y., Choi Y., Lipkowski J. Elucidating the interfacial interactions of copper and ammonia with the sulfur passive layer during thiosulfate mediated gold leaching // Electrochimica Acta. 2016. Vol. 210. P. 925–934. <https://doi.org/10.1016/j.electacta.2016.06.009>.
7. Чебан А. Ю. Способ и оборудование для открытой разработки маломасштабных кругопадающих месторождений // Вестник Магнитогорского государственного технического университета им. Г. И. Носова. 2017. Т. 15. № 3. С. 18–23. <https://doi.org/10.18503/1995-2732-2017-15-3-18-23>.
8. Pan Y., Liu Q., Liu Q., Liu J., Peng X., Huang X., et al. Full-scale linear cutting tests to check and modify a widely used semi-theoretical model for disc cutter cutting force prediction // Acta Geotechnica. 2020. Vol. 15. P. 1481–1500. <https://doi.org/10.1007/s11440-019-00852-4>.



9. Рубцов С. К., Ершов В. П., Сидоров Е. Ю. Сравнительный анализ применение неэлектрических систем инициирования на горнодобывающих предприятиях // Горный вестник Узбекистана. 2005. № 2. С. 61–65.
10. Лещинский А. В., Шевкун Е. Б., Вершинина А. Р., Белозеров И. Н. Выбор пути повышения производительности карьерного экскаватора // Маркшейдерия и недропользование. 2021. № 1. С. 40–45.
11. А. С. 1207399 СССР. Самоходный мощный экскаватор / В. Лубрих, Д. Гоффманн. Заявл. 29.08.1981; опубл. 23.01.1986. Бюл. № 3.
12. Чебан А. Ю. Добычной комплекс для открытой разработки месторождений твердых полезных ископаемых // Горное оборудование и электромеханика. 2017. № 3. С. 8–11.
13. Казаков В. А., Кубышкин И. П. Добычной комплекс ДК-2000 // Горное оборудование и электромеханика. 2007. № 12. С. 35–38.
14. Ситников Р. А. Гидромеханическая зачистка рудной мелочи – эффективный путь снижения потерь руды // Вестник Читинского государственного университета. 2010. № 2. С. 18–22.
15. Павлов А. М., Семенов Ю. М. Применение вакуумной технологии при зачистке руды в условиях криолитозоны рудника «Ирокинда» // Горный информационно-аналитический бюллетень. 2007. № 11. С. 24–29.
16. Санакулов К. С., Руднев С. В., Канцель А. В. О возможности отработки месторождения Учкулач с использованием технологии рентгенрадиометрического обогащения свинцово-цинковых руд // Горный вестник Узбекистана. 2011. № 1. С. 17–20.
17. А. С. 1120104 СССР. Способ формирования качества руд при добыче и рудоскат для его осуществления / В. А. Шестаков, В. А. Хакулов, Г. А. Семочкин. Заявл. 14.03.1983; опубл. 23.10.1984. Бюл. № 39.
18. Увеличение продуктивности рудника экономически эффективным методом с помощью ALLU // Горная промышленность. 2020. № 1. С. 68–69.
19. Чебан А. Ю. Способ выемки взорванной горной массы экскаватором при разработке сложноструктурных месторождений // Маркшейдерский вестник. 2020. № 2. С. 66–70.
20. Чебан А. Ю. Техническое оснащение предприятий по добыче нерудных строительных материалов в Хабаровском крае // Механизация строительства. 2017. Т. 78. № 2. С. 23–26.

References

1. Oganesian L. V. Ecological, technical and technological issues of development of non-conventional sources of mineral raw materials. *Mineral'nye resursy Rossii. Ekonomika i upravlenie = Mineral Resources of Russia. Economics & Management*. 2019;2:48-52. (In Russ.).
2. Espinoza R. D., Rojo J. Towards sustainable mining (Part I): valuing investment opportunities in the mining sector. *Resources Policy*. 2017;52:7-18. <https://doi.org/10.1016/j.resourpol.2017.01.011>.
3. Hidayah N. N., Abidin S. Z. The evolution of mineral processing in extraction of rare earth elements using liquid-liquid extraction: a review. *Minerals Engineering*. 2018;121: 146-157. <https://doi.org/10.1016/j.mineng.2018.03.018>.
4. Jang H., Topal E., Kawamura Y. Decision support system of unplanned dilution and ore-loss in underground stoping operations using a neuro-fuzzy system. *Applied Soft Computing*. 2015;32:1-12. <https://doi.org/10.1016/j.asoc.2015.03.043>.
5. Cheban A. Yu. Engineering of Complex Structure Apatite Deposits and Excavating-Sorting Equipment for Its Implementation. *Zapiski Gornogo instituta = Journal of Mining Institute*. 2019;238:399-404. (In Russ.). <https://doi.org/10.31897/PMI.2019.4.399>.
6. Smith S. R., Zhou C., Baron J. Y., Choi Y., Lipkowski J. Elucidating the interfacial interactions of copper and ammonia with the sulfur passive layer during thiosulfate mediated gold leaching. *Electrochimica Acta*. 2016;210: 925-934. <https://doi.org/10.1016/j.electacta.2016.06.009>.
7. Cheban A. Yu. Method and equipment for opencast mining of small steeply dipping deposits. *Vestnik Magnitogorskogo gosudarstvennogo tekhnicheskogo universiteta im. G. I. Nosova = Vestnik of Nosov Magnitogorsk State Technical University*. 2017;15(3):18-23. (In Russ.). <https://doi.org/10.18503/1995-2732-2017-15-3-18-23>.
8. Pan Y., Liu Q., Liu Q., Liu J., Peng X., Huang X., et al. Full-scale linear cutting tests to check and modify a widely used semi-theoretical model for disc cutter cutting force prediction. *Acta Geotechnica*. 2020;15:1481-1500. <https://doi.org/10.1007/s11440-019-00852-4>.
9. Rubtsov S. K., Ershov V. P., Sidorov E. Yu. Comparative analysis of non-electric initiation system application at mining enterprises. *Gornyi vestnik Uzbekistana = Mining bulletin of Uzbekistan*. 2005;2:61-65. (In Russ.).
10. Leshhinskij A. V., Shevkun E. B., Vershinina A. R., Belozerov I. N. Choosing a way of improving mine excavator performance. *Marksheideriya i nedropol'zovanie = Mine Surveying and Subsurface Use*. 2021;1:40-45. (In Russ.).
11. Lubrikh V., Goffmann D. Self-propelled powerful excavator. The author's certificate of the USSR, no. 1207399; 1986. (In Russ.).
12. Cheban A. Yu. Production complex for open-cast mining of solid minerals. *Gornoe oborudovanie i elektromekhanika = Mining Equipment and Electromechanics*. 2017;3:8-11. (In Russ.).
13. Kazakov V. A., Kubyshkin I. P. Mining complex DK-2000. *Gornoe oborudovanie i elektromekhanika = Mining Equipment and Electromechanics*. 2007;12:35-38. (In Russ.).
14. Sitnikov R. A. Hydromechanical cleaning of fine ore as an effective method of ore loss reduction. *Vestnik Chitinskogo gosudarstvennogo universiteta = Bulletin of Chita State University*. 2010;2:18-22. (In Russ.).
15. Pavlov A. M., Semenov Yu. M. Using vacuum technology for ore cleaning in the Irokinda mine permafrost zone. *Gornyi informatsionno-analiticheskii byulleten' = Mining informational and analytical bulletin*. 2007;11:24-29. (In Russ.).
16. Sanakulov K. S., Rudnev S. V., Kantsel' A. V. On



possibility of Uchkulach deposit development using X-ray radiometric concentration of lead-zinc ores. *Gornyi vestnik Uzbekistana* = *Mining bulletin of Uzbekistan*. 2011;1:17-20. (In Russ.).

17. Shestakov V. A., Khakulov V. A., Semochkin G. A. *Method of ore quality forming at mining and ore chute for its implementation*. Inventor's Certificate of the USSR, no. 1120104; 1984. (In Russ.).

18. Improving production performance of the mine using an economically efficient method with the help of ALLU.

Gornaya promyshlennost' = *Russian Mining Industry*. 2020;1:68-69. (In Russ.).

19. Cheban A. Yu. Method for exploding exploded rock mass by excavator when developing complex deposits. *Marksheiderskii vestnik* = *Mine Surveying Bulletin*. 2020;2:66-70. (In Russ.).

20. Cheban A. Yu. Technical equipment of the enterprises for extraction of non-metallic building materials in the Khabarovsk territory. *Mekhanizatsiya stroitel'stva*. 2017;78 (2):23-26. (In Russ.).

Информация об авторе / Information about the author



Чебан Антон Юрьевич,
кандидат технических наук, доцент,
ведущий научный сотрудник Лаборатории геотехнологии и горной теплофизики,
Институт горного дела ДВО РАН,
г. Хабаровск, Россия,
chebanay@mail.ru,
<https://orcid.org/0000-0003-2707-626X>.

Anton Yu. Cheban,
Cand. Sci. (Eng.), Associate Professor,
Leading Researcher of the Laboratory of Geotechnology and Mining Thermophysics,
Mining Institute, Far East Branch of the Russian Academy of Sciences,
Khabarovsk, Russia,
chebanay@mail.ru,
<https://orcid.org/0000-0003-2707-626X>.

Вклад автора / Contribution of the author

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

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

Конфликт интересов / Conflict of interests

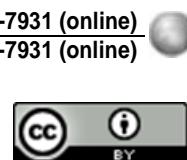
Автор заявляет об отсутствии конфликта интересов.
The author declares no conflicts of interests.

Автор прочитал и одобрил окончательный вариант рукописи.
The final manuscript has been read and approved by the author.

Информация о статье / Information about the article

Статья поступила в редакцию 21.06.2021; одобрена после рецензирования 13.09.2021; принятая к публикации 15.10.2021.

The article was submitted 21.06.2021; approved after reviewing 13.09.2021; accepted for publication 15.10.2021.

**Научная статья****УДК 622.243.24****<https://doi.org/10.21285/2686-9993-2021-44-4-448-457>**

Исследование совместного влияния некоторых факторов на очистку ствола скважины

Анатолий Иванович Ламбин^a^aИркутский национальный исследовательский технический университет, г. Иркутск, Россия

Резюме. Изучение поведения транспорта шлама в различных условиях с помощью экспериментальных наблюдений и вычислительной гидродинамики является основным методом анализа влияния параметров шлама, параметров жидкости и рабочих параметров на очистку скважин. Несмотря на обилие моделей и рекомендаций исследователей, остаются проблемы с точностью определения высоты слоя шлама, критической скорости и других ключевых параметров, что усложняет задачу эффективного решения проблемы очистки ствола скважины. Целью представленного исследования являлось проведение анализа моделей, получаемых с помощью организации полного факторного эксперимента и дисперсионного анализа для выявления влияния таких факторов, как вязкость бурового раствора, скорость его течения в условиях кольцевого пространства и угол наклона скважины на степень выноса модельного шлама. Подобные исследования проводятся с использованием специальных устройств, называемых потоковыми контурами. В ходе проведения работы экспериментальные данные были взяты из литературных источников. Для организации полного факторного эксперимента данные зависимой величины были сведены в комбинационный квадрат, что упростило кодирование факторных величин. После постановки полного факторного эксперимента автором получены модели, позволившие оценить вклад изучаемых факторов в процесс удаления продуктов разрушения в рамках тех их интервалов, которые были определены в ходе постановки задач исследования. Полученные модели позволили установить степень влияния каждого из факторов на изучаемый процесс. Результаты проведенного далее дисперсионного анализа подтвердили указанную степень влияния и определили ранг каждого из факторов в процентном соотношении.

Ключевые слова: скважина, транспорт шлама, факторный анализ, дисперсия

Для цитирования: Ламбин А. И. Исследование совместного влияния некоторых факторов на очистку ствола скважины // Науки о Земле и недропользование. 2021. Т. 44. № 4. С. 448–457. <https://doi.org/10.21285/2686-9993-2021-44-4-448-457>.

Original article

Studying joint influence of a number of factors on borehole cleaning

Anatoliy I. Lambin^a^aIrkutsk National Research Technical University, Irkutsk, Russia

Abstract. Studying the behavior of cuttings transport under various conditions using experimental observations and computational fluid dynamics is the main method for analyzing the influence of cuttings, fluid and operating parameters on well cleaning. Despite the existing abundant models and recommendations of researchers, still there are problems with the accuracy of determining the cuttings layer height, critical velocity and other key parameters, which complicates the task of effective solution of the problem of borehole cleaning. The purpose of the study is to analyze the models obtained via the organization of a full factorial experiment and variance analysis to identify the influence of such factors as viscosity and flow rate of the drilling fluid in the annular space and the inclination angle of the well on the degree of cuttings transport. The studies of the kind are carried out using special devices called flow loops. Experimental data were taken from literature sources. To organize a full factorial experiment, the data of the dependent variable were combined into a combinational square, which simplified the coding of factor values. After setting the full factorial experiment, the models were obtained that made it possible to assess the contribution of the studied factors to the process of destruction product removal within the intervals determined while setting the research tasks. The obtained models allowed to determine the influence degree of each of the factors on the process under investigation. The results of the succeeding analysis of variance confirmed the indicated degree of influence and determined the rank of each of the factors in percentage.

© Ламбин А. И., 2021



Keywords: well, cuttings transport, factorial analysis, variance

For citation: Lambin A. I. Studying joint influence of a number of factors on borehole cleaning. *Nauki o Zemle i nedropol'zovanie = Earth sciences and subsoil use.* 2021;44(4):448-457. (In Russ.). <https://doi.org/10.21285/2686-9993-2021-44-4-448-457>.

Введение

Удаление продуктов разрушения в процессе бурения является одной из проблемных задач очистки ствола скважины при бурении наклонно-направленных скважин [1]. Проблема удаления шлама при наклонно-направленном бурении связана с гравитационными силами. Шлам под действием силы тяжести оседает на нижней стенке скважины, эффективность его транспорта потоком жидкости снижается. Осложнения, возникающие при неэффективном транспорте шлама, включают в себя прихват бурильной колонны, износ долота, снижение скорости проходки, высокий крутящий момент и сопротивление, а также многое другое. Изучению указанной проблемы посвящено множество исследовательских работ, в основе которых лежит осуществление численного моделирования [2] или постановка эксперимента на устройствах в виде потоковых петель, имитирующих кольцевое пространство скважин, через которое пропускаются испытуемые жидкости, несущие в себе модельный шлам¹ [3–5].

В настоящее время исследования смещаются в сторону экспериментальных подходов, целью которых является объяснение переноса шлама при всех углах наклона, особенно в наклонно-направленных скважинах с горизонтальным окончанием [6, 7]. Все проточные контуры имеют прозрачную часть кольцевого рабочего участка, что позволяет наблюдать за механизмом транспортировки шлама. Эти контуры потока предоставляют необходимые экспериментальные данные [8–10].

Результаты исследований по транспортировке выбуренной породы интегрируются в программу бурения, часть проблем с очисткой ствола скважины устраняется, что способствует увеличению производительности бурения [11, 12].

К сожалению, в приведенных исследованиях влияющие факторы в большинстве случаев оцениваются отдельно, что не дает возможности определить влияние взаимосвязи факторов на откликовую величину.

Материалы и методы исследования

В наших предыдущих работах² приведен анализ результатов зарубежных исследований [13] с целью определения влияния изучаемых факторов в их совокупности на зависимую величину. Для этого экспериментальные данные были представлены в виде латинского квадрата (рис. 1) для удобства составления полного факторного плана типа 2³ [14–16].

С учетом проведенного нами ранее анализа в ходе представленного в данной работе исследования в качестве независимых переменных были приняты вязкость бурового раствора, угол наклона потоковой петли и скорость потока жидкости. При составлении моделей все данные были подразделены на две группы по вязкости раствора. В первую группу вошли данные, относящиеся к интервалу вязкости от 1 до 2,5 сР, а во вторую группу – данные, относящиеся к интервалу вязкости от 2,5 до 6 сР.

По первой группе построена матрица планирования эксперимента (таблица).

В ходе составления таблицы было проведено усреднение построчных данных, определена их дисперсия и выявлена их однородность по критерию Кокрена. Здесь же показаны данные, вычисленные по модели, и возведенные в квадрат разности между измеренными и вычисленными по модели данными.

Дисперсия воспроизводимости опыта $S^2(Y) = \frac{171}{8} = 21,375$. Отсюда среднеквадратическая ошибка эксперимента составляет

¹ Ламбин А. И. Вынос продуктов разрушения при бурении наклонно-направленных скважин // Известия Сибирского отделения Секции наук о Земле Российской академии естественных наук. Геология, поиски и разведка рудных месторождений. 2016. № 1. С. 75–79.

² Там же.



$\varphi \backslash v$	1,84	2,21	2,58	3,31	μ
60	26	50	60	73	1
	34	56	60	81	2,5
	29	45	52	70	6
70	30	59	70	81	1
	40	62	75	83	2,5
	30	50	55	71	6
80	35	62	75	88	1
	42	68	77	88	2,5
	32	48	52	70	6
90	38	70	83	97	1
	44	72	88	98	2,5
	38	50	65	81	6

Рис. 1. Комбинационный квадрат

φ – угол наклона, град.; v – скорость потока жидкости, м/с; μ – вязкость жидкости, сР

Fig. 1. Combination square

φ – inclination angle, degree; v – fluid flow rate, m/s; μ – fluid viscosity, cP

Матрица планирования и расчет дисперсий Planning matrix and variance calculation

Номер опыта	X_0	X_1	X_2	X_3	X_1X_2	X_1X_3	X_2X_3	$X_1X_2X_3$	Y_1	Y_2	\bar{Y}	$\sum S_i^2$	\hat{Y}	$(Y - \hat{Y})^2$
1	1	-1	-1	-1	1	1	1	-1	26	30	28	8	28,6	0,36
2	1	1	-1	-1	-1	-1	1	1	35	38	36,5	4,5	38,6	4,41
3	1	-1	1	-1	-1	1	-1	1	73	81	77	32	78,4	1,96
4	1	1	1	-1	1	-1	-1	-1	88	97	92,5	40,5	88,4	16,81
5	1	-1	-1	1	1	-1	-1	1	34	40	38	32	34,1	15,21
6	1	1	-1	1	-1	1	-1	-1	42	44	43	2	44,1	1,21
7	1	-1	1	1	-1	-1	1	-1	81	83	82	2	83,9	3,61
8	1	1	1	1	1	1	1	1	88	98	93	50	93,9	0,81
Σ	8	0	0	0	0	0	0	0	–	–	–	171	–	44,38

$S(Y) = 4,62$. Среднеквадратическая дисперсия ошибки определения коэффициентов регрессии определяется как $S(b_i) = \frac{S(Y)}{\sqrt{N}m} = \frac{4,26}{\sqrt{8 \cdot 2}} = 1,156$. Коэффициенты уравнения регрессии определялись по формуле $B = (X^T X)^{-1} X^T Y$ [12]. Поделив полученные таким образом коэффициенты регрессии на среднеквадратическую ошибку определения коэффициентов и сравнив частное от деления с критерием Стьюдента (t -критерием), равным для нашего случая 2,306, окончательно получаем уравнение регрессии:

$$Y = 61,25 + 5,0X_1 + 24,88X_2 + 2,75X_3.$$

Дисперсия адекватности определяется по формуле $S_{\text{ад}}^2 = \frac{m}{N-l} \sum (Y - \hat{Y})^2 = \frac{2}{8-4} 44,38 = 22,19$. По критерию Фишера (F -критерию)

определяем адекватность модели $F_{\text{расч}} = \frac{S_{\text{ад}}^2}{S^2(Y)} = \frac{22,19}{21,375} = 1,04$. Так как это значение меньше табличного, гипотеза адекватности модели не отвергается.

По второй группе данных получена следующая модель:

$$Y_1 = 58,19 + 3,44X_1 + 22,1X_2 - 5,6X_3.$$

Путем анализа моделей, полученных после постановки полного факторного эксперимента, выявлены следующие соотношения:

- вязкость жидкости в интервале 1–2,5 сР способствует удалению продуктов разрушения, а в интервале 2,5–6 сР препятствует ему;
- рост угла наклона незначительно улучшает очистку скважины;
- скорость потока является определяю-



щим фактором в процессе удаления из скважины продуктов разрушения;

– с изменением вклада в процесс одного из факторов (в данном случае вязкости) меняются вклады остальных.

Здесь следует отметить, что при проведении полного факторного эксперимента получается модель в нормированных координатах. Это обстоятельство несколько удлиняет интерпретацию получаемых уравнений.

На базе экспериментальных данных [10] проведен дисперсионный анализ, который дает оценки модели по естественным координатам.

Суть дисперсионного анализа, иногда называемого ANOVA (от англ. *analysis of variance*), заключается в изучении влияния одной или нескольких независимых переменных, обычно именуемых факторами, на зависимую переменную [14, 17]. При этом предполагается нормальное распределение значений изучаемого признака, равенство дисперсий в сравниваемых генеральных совокупностях и случайный и независимый характер выборки. Дисперсионный анализ в статистике базируется на следующем законе: сумма квадратов отклонений объединенной выборки равна сумме квадратов внутригрупповых отклонений и сумме квадратов межгрупповых отклонений. Для исследования используется критерий Фишера для установления значимости различия межгрупповых дисперсий от внутригрупповых.

Результаты исследования и их обсуждение

По критерию Фишера в среде MATLAB нами был проведен предварительный анализ значимости межгрупповых дисперсий (рис. 2).

По показателю P_{rob} (F-statistic) $< 0,05$ была определена значимость эффектов или степень

доверия выводам [18]. Все три эффекта значимы ($p < 0,05$), то есть с вероятностью 95 % вывод распространяется на все объекты. В этом случае нулевая гипотеза отвергается. Нулевая гипотеза говорит о том, что между средними в генеральной совокупности нет различий. Здесь под X_1 закодирована вязкость жидкости, под X_2 – угол наклона потоковой петли, под X_3 – скорость течения жидкости.

По критерию Фишера можно судить о вкладе каждого фактора в общий процесс очистки скважины. Из значений, приведенных на рис. 2, видно, что наибольший эффект осуществляется за счет скорости движения жидкости, затем за счет ее вязкости и в последнюю очередь за счет угла наклона. В процентном выражении эти эффекты имеют следующее соотношение: 74 %, 16 % и 10 % соответственно.

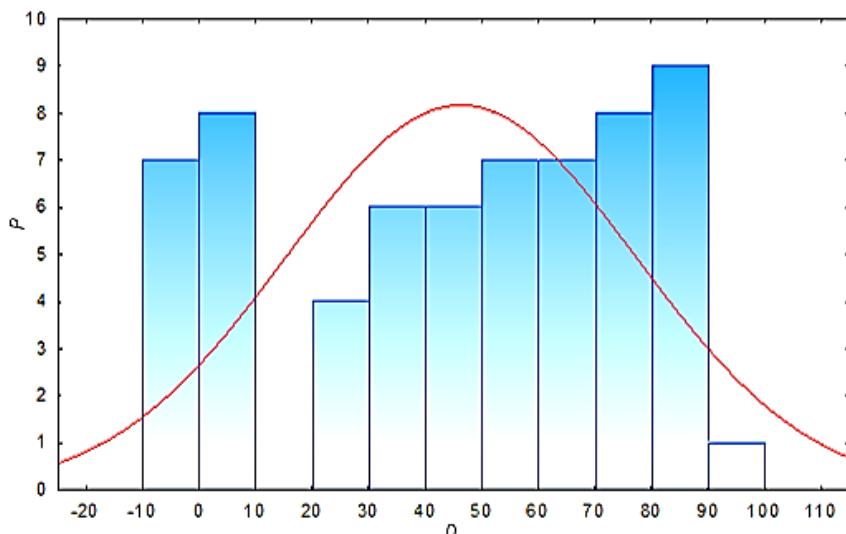
Следует отметить, что в реальной скважине положительного эффекта от угла наклона быть не должно. Большинство исследователей отмечают, что наибольшее сопротивление выносу шлама оказывают углы в 40–60° [2]. При исследованиях в потоковых петлях углы устанавливаются дискретно и в некоторых интервалах углов возможны положительные эффекты, как и в данном исследовании. В реальной наклонно-направленной скважине с горизонтальным окончанием критический угол в 40–60° уже присутствует в составе гаммы непрерывных углов от 0 до 90°, что и будет доказывать отсутствие положительного эффекта.

Далее более подробный дисперсионный анализ осуществляется с помощью пакета STATISTICA [19].

Степень отклонения распределения показателя очистки скважины от нормального изображена на рис. 3.

Analysis of Variance						
Source	Sum Sq.	d.f.	Mean Sq.	F	Prob>F	
X1	1410.2	2	705.08	6.17	0.0048	
X2	1240.6	3	413.54	3.62	0.0216	
X3	9528.8	3	3176.27	27.8	0	
Error	4342.4	38	114.27			
Total	16714.5	46				

Рис. 2. Дисперсионный анализ, выполненный в среде MATLAB
Fig 2. Analysis of variance performed in MATLAB

**Рис. 3. Гистограмма распределения процентного соотношения шлама***P – вероятность входа в нормальный закон; D – дисперсия***Fig. 3. Cuttings percentage distribution histogram***P – probability of entering the normal law; D – variance*

Как видно из гистограммы, распределение процентного соотношения шлама в нашей выборке несколько отличается от нормального (в середине – «провал»). Генеральное среднее составляет 45,9683, генеральное стандартное отклонение – 30,7487. Примерно такие же площади занимают гистограммы эффектов под кривой нормального распределения. Эти оценки позволяют использовать параметрический метод, основанный на предположении о нормальном распределении.

Результаты дисперсионного анализа, проведенного с использованием программы STATISTICA, показаны на рис. 4. Кодирование влияющих факторов проведено следующим образом: A – вязкость жидкости; B – угол наклона потоковой петли; C – скорость потока жидкости.

Как видно из рис. 4, при проведении более расширенного анализа результатов исследования появились дисперсии, оценивающие взаимодействие факторов, но тенденция осталась та же. Оценки по критерию Фишера несколько снизились, но их соотношения остались прежними.

На рис. 5 показано детальное распределение дисперсии взаимодействия вязкости и скорости движения жидкости.

Таким образом, анализ, проведенный в этой среде, дает большие возможности интерпретации результатов дисперсионного анализа.

Программа STATISTICA обладает также расширенными возможностями визуализации дисперсионного анализа [20]. К примеру, на рис. 6 показано распределение влияющих факторов и откликовой переменной рассматриваемой задачи.

Effect	Effective hypothesis decomposition			
	SS	Degr. of Freedom	MS	F
Intercept	174950,0	1	174950,0	772,9748
A	1663,6	2	831,8	3,6752
B	1681,5	3	560,5	2,4764
C	14773,2	3	4924,4	21,7573
A*B	277,6	6	46,3	0,2044
A*C	540,2	6	90,0	0,3978
B*C	107,7	9	12,0	0,0529
A*B*C	166,9	18	9,3	0,0410
Error	452,7	2	226,3	

Рис. 4. Дисперсионный анализ, выполненный в программе STATISTICA*Fig. 4. Analysis of variance performed in STATISTICA*



Cell No.	A*C; Unweighted Means Effective hypothesis decomposition						
	A	C	D Mean	D Std.Err.	D -95.00%	D +95.00%	N
1	1	1	27,91667	6,866788	-1,62874	57,4621	6
2	1	2	60,50000	7,522189	28,13463	92,8654	4
3	1	3	72,75000	7,522189	40,38463	105,1154	4
4	1	4	81,25000	7,522189	48,88463	113,6154	4
5	2	1	40,50000	7,522189	8,13463	72,8654	4
6	2	2	64,75000	7,522189	32,38463	97,1154	4
7	2	3	75,25000	7,522189	42,88463	107,6154	4
8	2	4	86,75000	7,522189	54,38463	119,1154	4
9	3	1	32,25000	7,522189	-0,11537	64,6154	4
10	3	2	48,00000	7,522189	15,63463	80,3654	4
11	3	3	55,75000	7,522189	23,38463	88,1154	4
12	3	4	73,75000	7,522189	41,38463	106,1154	4

Рис. 5. Распределение дисперсии взаимодействия вязкости и скорости движения жидкости
Fig. 5. Distribution of fluid viscosity and velocity interaction variance

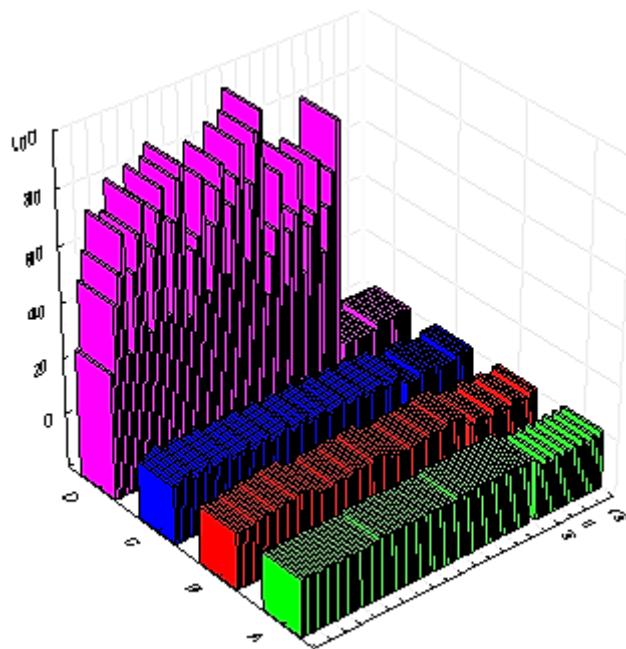


Рис. 6. Последовательный график изменчивости факторов и откликовой величины
Fig. 6. Sequential graph of factors and response magnitude variability

На рис. 7 отображена последовательность изменения процентного соотношения извлеченного шлама. Из графика видно, что максимальный эффект достигается при вязкости жидкости, равной 2 сР, угле наклона в 90° и максимальной скорости движения жидкости. Как отмечалось ранее, в реальной скважине угол ее наклона в силу его непрерывности будет оказывать отрицательное влияние на вынос шлама. Также в переводе на реальную скважину видно, что увеличение вязкости свыше 2 сР приводит к уменьшению эффек-

тивности выноса продуктов разрушения. В литературных источниках это явление объясняется сменой турбулентного режима на переходный или даже ламинарный режим под действием увеличения вязкостных сил.

Кроме всего прочего, программа позволяет строить трехмерные графики совместного влияния факторов на откликовую величину. К примеру, на рис. 8 показано влияние вязкости и скорости потока жидкости на вынос шлама в его процентном соотношении.

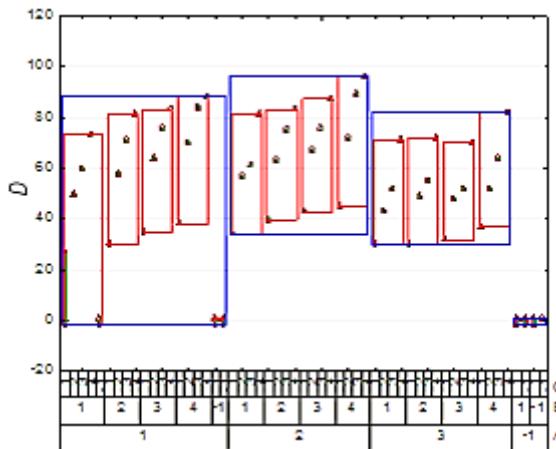


Рис. 7. График изменчивости откликовой величины
D – дисперсия; нижняя шкала – структура вложенности факторов

Fig. 7. Graph of response magnitude variability
D – variance; lower scale – factor nesting structure

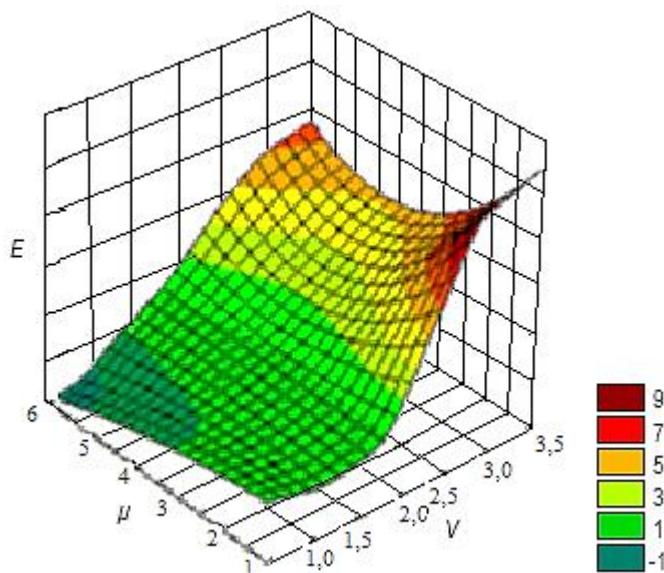


Рис. 8 Зависимость среднего эффекта очистки от совместного влияния вязкости и скорости потока жидкости
E – эффективность, μ – вязкость; V – скорость потока

Fig. 8. Dependence of the average cleaning effect on the combined influence of fuel viscosity and flow rate
E – efficiency, μ – viscosity; V – flow rate

Заключение

Таким образом, совместное рассмотрение факторов после постановки полного факторного эксперимента определяет одновременную изменчивость влияния факторов в процессе при изменении хотя бы одного из них.

При использовании дисперсионного анализа требования к экспериментальным данным более строгие, чем при использовании полного факторного эксперимента. В отличие от полного факторного эксперимента дисперсионный анализ дает оценки модели по естественным координатам, а не по нормированным.

При дисперсионном анализе требуется проверка совокупности данных на принадлежность к тому или иному распределению. Далее требуется проверка на нулевую гипотезу, и только после этого проводится более детальный анализ. Значимость каждого фактора и его влияния на другие факторы можно определить по критерию Фишера.

При исследованиях с потоковыми петлями выводы, касающиеся фактора «угол наклона», должны делаться отдельно от совокупности его с другими факторами.



Список источников

1. Крылов В. И., Крецул В. В. Особенности технологии промывки горизонтальных скважин // Нефтяное хозяйство. 2001. № 6. С. 36–40.
2. Hamoudi M., Abdulwahhab A., Khalid A., Authman D., Mohammed Ameen R. Transportation of cuttings in inclined wells // UKH Journal of Science and Engineering. 2018. Vol. 2. Iss. 2. P. 3–13. <https://doi.org/10.25079/ukhjse.v2n2y2018.pp3-13>.
3. Alsaihati A., Elkatatny S., Abdulraheem A. Real-time prediction of equivalent circulation density for horizontal wells using intelligent machines // ACS Omega. 2021. Vol. 6. Iss. 1. P. 934–942. <https://doi.org/10.1021/acsomega.0c05570>.
4. Leporini M., Marchetti B., Corvaro F., di Giovine G., Polonara F., Terenzi A. Sand transport in multiphase flow mixtures in horizontal pipeline: an experimental investigation // Petroleum. 2019. Vol. 5. Iss. 2. P. 161–170. <https://doi.org/10.1016/j.petlm.2018.04.004>.
5. Qu J., Yan T., Sun X., Li Z., Li W. Decaying swirl flow and particle behavior through the hole cleaning device for horizontal drilling of fossil fuel // Energies. 2019. Vol. 12. Iss. 3. P. 336. <https://doi.org/10.3390/en12030336>.
6. Wei N., Meng Y., Li G., Wan L., Xu Z., Xu X., et al. Cuttings transport models and experimental visualization of underbalanced horizontal drilling // Mathematical Problems in Engineering. 2013. P. 764782. <https://doi.org/10.1155/2013/764782>.
7. Okon A. N., Agwu O. E., Udoh F. D. Evaluation of the cuttings carrying capacity of a formulated synthetic-based drilling mud // SPE Nigeria Annual International Conference and Exhibition. Lagos, 2015. [Электронный ресурс]. URL: <https://onepetro.org/SPENAIC/proceedings-abstract/15NAIC/AII-15NAIC/SPE-178263-MS/184378> (22.08.2021).
8. Okrajni S., Azar J. J. The effects of mud rheology on annular hole cleaning in directional wells // SPE Drilling Engineering. 1986. Vol. 1. Iss. 4. P. 297–308. <https://doi.org/10.2118/14178-PA>.
9. Wang K., Yan T., Sun X., Shao S., Luan S. Review and analysis of cuttings transport in complex structural wells // The Open Fuels & Energy Science Journal. 2013. Vol. 6. P. 9–17. <https://doi.org/10.2174/1876973X20130610001>.
10. Lin T., Wei C., Zhang Q., Sun T. Calculation of equivalent circulating density and solids concentration in the annular when reaming the hole in deepwater drilling // Chemistry and Technology of Fuels and Oils. 2016. Vol. 52. Iss. 1. P. 70–75. <https://doi.org/10.1007/s10553-016-0674-5>.
11. Ofesi S. F., Onwukwe S. I., Duru U. I. Optimizing hole cleaning using low viscosity drilling fluid // Advances in Petroleum Exploration and Development. 2017. Vol. 14. Iss. 1. P. 55–61. <https://doi.org/10.3968/9658>.
12. Dokhani V., Ma Y., Yu M. Determination of equivalent circulating density of drilling fluids in deepwater drilling // Journal of Natural Gas Science and Engineering. 2016. Vol. 34. P. 1096–1105. <https://doi.org/10.1016/j.jngse.2016.08.009>.
13. Piroozian A., Ismail I., Yaacob Z., Babakhani P., Ismail A. S. I. Impact of drilling fluid viscosity, velocity and hole inclination on cuttings transport in horizontal and highly deviated wells // Journal of Petroleum Exploration and Production Technology. 2012. Vol. 2. P. 149–156. <https://doi.org/10.1007/s13202-012-0031-0>.
14. Джонсон Н., Лион Ф. Статистика и планирование эксперимента в технике и науке: методы планирования эксперимента / пер. с англ. под ред. Э. К. Лецкого, Е. В. Марковой. М.: Мир, 1981. 516 с.
15. Адлер Ю. П., Маркова Е. В., Грановский Ю. В. Планирование эксперимента при поиске оптимальных условий. М.: Наука, 1976. 279 с.
16. Хартман К., Лецкий Э., Шефер В. [и др.]. Планирование эксперимента в исследовании технологических процессов / пер. с нем. Г. А. Фомина, Н. С. Лецкой. М.: Мир, 1977. 552 с.
17. Шеффе Г. Дисперсионный анализ / пер. с англ. Б. А. Севастьянова, В. П. Чистякова. М.: Наука, 1980. 512 с.
18. Субботина А. В., Гржибовский А. М. Описательная статистика и проверка нормального распределения количественных данных // Экология человека. 2014. № 2. С. 51–57.
19. Щукова К. Б. Применение однофакторного анализа для оценки производительности системы с помощью программы STATISTICA // Современная техника и технология. 2015. № 12 [Электронный ресурс]. URL: <https://technology.sciences.ru/2015/12/8849> (22.08.2021).
20. Algina J., Olejnik S. Conducting power analyses for ANOVA and ANCOVA in between-subjects designs // Evaluation & The Health Professions. 2003. Vol. 26. Iss. 3. P. 288–314. <https://doi.org/10.1177/0163278703255248>.

References

1. Krylov V. I., Kretsul V. V. Features of flushing technology for horizontal wells. *Neftyanoe khozyaistvo*. 2001;6:36-40. (In Russ.).
2. Hamoudi M., Abdulwahhab A., Khalid A., Authman D., Mohammed Ameen R. Transportation of cuttings in inclined wells. *UKH Journal of Science and Engineering*. 2018;2(2):3-13. <https://doi.org/10.25079/ukhjse.v2n2y2018.pp3-13>.
3. Alsaihati A., Elkatatny S., Abdulraheem A. Real-time prediction of equivalent circulation density for horizontal wells using intelligent machines. *ACS Omega*. 2021;6(1):934-942. <https://doi.org/10.1021/acsomega.0c05570>.
4. Leporini M., Marchetti B., Corvaro F., di Giovine G., Polonara F., Terenzi A. Sand transport in multiphase flow mixtures in horizontal pipeline: an experimental investigation. *Petroleum*. 2019;5(2):161-170. <https://doi.org/10.1016/j.petlm.2018.04.004>.
5. Qu J., Yan T., Sun X., Li Z., Li W. Decaying swirl flow and particle behavior through the hole cleaning device for horizontal drilling of fossil fuel. *Energies*. 2019;12(3):336.



<https://doi.org/10.3390/en12030336>.

6. Wei N., Meng Y., Li G., Wan L., Xu Z., Xu X., et al. Cuttings transport models and experimental visualization of underbalanced horizontal drilling. *Mathematical Problems in Engineering*. 2013;764782. <https://doi.org/10.1155/2013/764782>.

7. Okon A. N., Agwu O. E., Udoh F. D. Evaluation of the cuttings carrying capacity of a formulated synthetic-based drilling mud. *SPE Nigeria Annual International Conference and Exhibition*. Lagos; 2015. Available from: <https://onepetro.org/SPENAIC/proceedings-abstract/15NAIC/All-15NAIC/SPE-178263-MS/184378> [Accessed 22^d August 2021].

8. Okrajni S., Azar J. J. The effects of mud rheology on annular hole cleaning in directional wells. *SPE Drilling Engineering*. 1986;1(4):297-308. <https://doi.org/10.2118/14178-PA>.

9. Wang K., Yan T., Sun X., Shao S., Luan S. Review and analysis of cuttings transport in complex structural wells. *The Open Fuels & Energy Science Journal*. 2013; 6:9-17. <https://doi.org/10.2174/1876973X20130610001>.

10. Lin T., Wei C., Zhang Q., Sun T. Calculation of equivalent circulating density and solids concentration in the annular when reaming the hole in deepwater drilling. *Chemistry and Technology of Fuels and Oils*. 2016;52(1):70-75. <https://doi.org/10.1007/s10553-016-0674-5>.

11. Ofesi S. F., Onwukwe S. I., Duru U. I. Optimizing hole cleaning using low viscosity drilling fluid. *Advances in Petroleum Exploration and Development*. 2017;14(1):55-61. <https://doi.org/10.3968/9658>.

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

13. Piroozian A., Ismail I., Yaacob Z., Babakhani P., Ismail A. S. I. Impact of drilling fluid viscosity, velocity and hole inclination on cuttings transport in horizontal and highly deviated wells. *Journal of Petroleum Exploration and Production Technology*. 2012;2:149-156. <https://doi.org/10.1007/s13202-012-0031-0>.

14. Johnson N. L., Leone F. C. Statistics and experimental design in engineering and the physical sciences. 1977. 516 p. (Russ. ed.: *Statistika i planirovanie eksperimenta v tekhnike i nauke: metody planirovaniya eksperimenta*. Moscow: Mir; 1981. 516 p.).

15. Adler Yu. P., Markova E. V., Granovskii Yu. V. *Experiment planning when searching for optimal conditions*. Moscow: Nauka; 1976. 279 p. (In Russ.).

16. Hartmann K., Lezki E., Schäfer W., et al. Planning an experiment in the study of technological processes. 1974. 552 p. (Russ. ed.: *Planirovanie eksperimenta v issledovaniyakh tekhnologicheskikh protsessov*. Moscow: Mir; 1977. 552 p.).

17. Scheffé H. The analysis of variance. 1959. 512 p. (Russ. ed.: *Dispersionnyi analiz*. Moscow: Nauka; 1980. 512 p.).

18. Subbotina A. V., Grjibovski A. M. Descriptive statistics and normality testing for quantitative data. *Ekologiya cheloveka = Human Ecology*. 2014;2:51-57. (In Russ.).

19. Shchukova K. B. The use of single-factor analysis to assess the performance of the system using STATISTICA. *Sovremennaya tekhnika i tekhnologii = Modern technics and technologies*. 2015;12. Available from: <https://technology.sciences.ru/2015/12/8849> [Accessed 22^d August 2021].

20. Algina J., Olejnik S. Conducting power analyses for ANOVA and ANCOVA in between-subjects designs. *Evaluation & The Health Professions*. 2003;26(3):288-314. <https://doi.org/10.1177/0163278703255248>.

Информация об авторе / Information about the author



Ламбин Анатолий Иванович,
кандидат технических наук,
доцент кафедры нефтегазового дела,
Институт недропользования,
Иркутский национальный исследовательский технический университет,
г. Иркутск, Россия,
alambin@ex.istu.edu.

Anatoly I. Lambin,
Cand. Sci. (Eng.),
Associate Professor, Oil and Gas Department,
Institute of Subsoil Use,
Irkutsk National Research Technical University,
Irkutsk, Russia,
alambin@ex.istu.edu.

Вклад автора / Contribution of the author

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

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



Конфликт интересов / Conflict of interests

Автор заявляет об отсутствии конфликта интересов.

The author declares no conflicts of interests.

Автор прочитал и одобрил окончательный вариант рукописи.

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

Информация о статье / Information about the article

Статья поступила в редакцию 01.07.2021; одобрена после рецензирования 26.10.2021; принята к публикации 29.11.2021.

The article was submitted 01.07.2021; approved after reviewing 26.10.2021; accepted for publication 29.11.2021.



ГИДРОГЕОЛОГИЯ И ИНЖЕНЕРНАЯ ГЕОЛОГИЯ

Научная статья

УДК 551.3.053

<https://doi.org/10.21285/2686-9993-2021-44-4-458-470>

**Морфометрический анализ для выявления
особенностей формирования паводковых потоков
(на примере Улан-Баторской агломерации)**

Елена Александровна Козырева^a, Артем Александрович Рыбченко^b,Содномсамбуу Дэмбэрэл^c^{a,b}Институт земной коры СО РАН, г. Иркутск, Россия^cИнститут астрономии и геофизики Монгольской академии наук, г. Улан-Батор, Монголия

Автор, ответственный за переписку: Козырева Елена Александровна, kozireva@crust.irk.ru

Резюме. Водные потоки, обладающие значительным расходом воды, имеют высокую разрушительную силу и могут приводить к катастрофическим последствиям. Для освоенных предгорных внутриконтинентальных территорий флювиальные процессы, вызванные неравномерным распределением дождевых осадков по площади, носят угрожающий характер. Целью данной работы являлся количественный морфометрический анализ территории для выявления особенностей формирования паводковых потоков. С использованием бассейнового подхода был выполнен анализ водосборных бассейнов и их ранжирование. На основе SRTM-снимков, фонового картографического материала при использовании геоинформационного программного обеспечения авторами были построены специализированные электронные карты, позволяющие получить количественные параметры, отражающие морфометрию анализируемых бассейнов: геометрию бассейнов, дренажную сеть и рельеф местности. На примере территории Улан-Баторской агломерации показано, как исходные морфометрические параметры бассейнов и водотоков (длина, ширина, площадь, периметр, эрозионное расчленение, плотность дренажной сети, коэффициент рельефа, коэффициент Мелтона и др.) формируют особенности паводковых потоков. Для освоенных территорий исходные данные по морфометрии водосборных бассейнов являются основой составления специализированных карт, которые используются при планировании и строительстве. Сочетание морфометрических показателей на территории Улан-Баторской агломерации свидетельствует о том, что в отдельных водосборных бассейнах возможно формирование крупных паводков и развитие опасных грязекаменных потоков.

Ключевые слова: поверхностные водотоки, морфометрия рельефа, водосборные бассейны, сели, паводки, подтопление, природные геологические опасности, количественные морфометрические показатели

Финансирование: исследование выполнено за счет гранта ученого совета по направлению «Научная школа Иркутского национального исследовательского технического университета совместно с Российской академией наук» № 01-РАН-21. При проведении исследования использовано оборудование центра коллективного пользования «Геодинамика и геохронология» Института земной коры СО РАН в рамках гранта № 075-15-2021-682.

Для цитирования: Козырева Е. А., Рыбченко А. А., Дэмбэрэл С. Морфометрический анализ для выявления особенностей формирования паводковых потоков (на примере Улан-Баторской агломерации) // Науки о Земле и недропользование. 2021. Т. 44. № 4. С. 458–470. <https://doi.org/10.21285/2686-9993-2021-44-4-458-470>.

HYDROGEOLOGY AND ENGINEERING GEOLOGY

Original article

**Morphometric analysis for flood flow formation feature
identification (on example of Ulaanbaatar agglomeration)**

Elena A. Kozyreva^a, Artem A. Rybchenko^b, Sodnomsambuu Demberel^c^{a,b}Institute of the Earth's Crust, Siberian Branch of the Russian Academy of Sciences, Irkutsk, Russia^cInstitute of Astronomy and Geophysics, Mongolian Academy of Sciences, Ulaanbaatar, Mongolia

Corresponding author: Elena A. Kozyreva, kozireva@crust.irk.ru

© Козырева Е. А., Рыбченко А. А., Дэмбэрэл С., 2021



Abstract. Water flows with significant flow rate feature a high destructive force and can lead to catastrophic consequences. Fluvial processes caused by uneven distribution of rain precipitation over the area pose risks to the developed inland foothill territories. The purpose of this study is to carry out a quantitative morphometric analysis of the territory in order to identify the formation features of flood flows. The analysis and ranking of catchment basins are performed using a basin approach. On the basis of SRTM images and the use of stock cartographic material in the GIS program the authors have built specialized electronic maps that allow to obtain quantitative parameters reflecting the morphometry of the basins under analysis including basin geometry, drainage network and terrain relief. On example of the Ulaanbaatar agglomeration territory it is shown how initial morphometric parameters of basins and watercourses (length, width, area, perimeter, erosion dissection, drainage network density, terrain relief coefficient, Melton coefficient, etc.) form the features of flood flow. For developed territories, the initial data on the catchment basin morphometry constitute the basis for compilation of specialized maps to be used in planning and construction. The combination of morphometric indicators on the territory of the Ulaanbaatar agglomeration indicates that there is possibility of large flood formation and development of dangerous mudstone flows in some catchment basins.

Keywords: surface watercourses, relief morphometry, catchment basins, mudflows, floods, flooding, natural geological hazards, quantitative morphometric indicators

Funding: the research was conducted under the grant from the Academic Council in the direction "Scientific School of Irkutsk National Research University in cooperation with the Russian Academy of Sciences" no. 01-RAS-21. The conducted research involved the use of the equipment of the Centre of Shared Use "Geodynamics and Geochronology" of the Institute of the Earth's Crust, Siberian Branch of the Russian Academy of Sciences supported by the grant no. 075-15-2021-682.

For citation: Kozyreva E. A., Rybchenko A. A., Demberel S. Morphometric analysis for flood flow formation feature identification (on example of Ulaanbaatar agglomeration). *Nauki o Zemle i nedropol'zovanie = Earth sciences and subsoil use.* 2021;44(4):458-470. (In Russ.). <https://doi.org/10.21285/2686-9993-2021-44-4-458-470>.

Введение

Поверхностные водные потоки – как временные, так и постоянные – при высоких показателях расхода водотока способны приобретать значительную разрушительную силу. В связи с этим они становятся причиной социального и экономического ущерба на заселенных территориях [1–3]. Важным вопросом при исследовании разрушительных процессов, вызванных поверхностными водотоками, является выявление морфометрических показателей водосборных бассейнов как фактора, влияющего на формирование паводковых потоков [4–6]. Определение количественных морфометрических характеристик и их взаимосвязи с формированием паводковых водных и грязекаменных потоков актуально для многих горных и предгорных районов мира [7–9]. В условиях изменяющегося климата актуальность формирования паводковых потоков возрастает [10–12].

Интересен в этом отношении район Улан-Баторской агломерации в Монголии. Монголия расположена внутри Азиатского континента, климатические условия страны резко континентальные с небольшим количеством атмосферных осадков, в теплый период выпа-

дает 93 % годового количества осадков. Несмотря на небольшое количество осадков, дождевые паводки на территории Монголии происходят достаточно часто. Согласно литературным источникам, они фиксировались в 1613, 1623, 1695, 1696, 1701, 1715, 176, 1830 и 1868 гг. [13]. По данным систематических наблюдений паводки отмечались в 1966, 1967, 1971, 1974, 1976, 1982, 1984–1986, 1988, 1989, 1993 и 1994 гг. на следующих реках: Селенга, Дэлгэр-Мурен, Онон, Орхон, Туул, Хараа-Гол и Иро [13].

Город Улан-Батор расположен вдоль долины реки Туул и впадающих в нее рек – Толгойтын-Гол, Сэлбэ-Гол, Улиастайн-Гол и других. На основе исторических и опубликованных данных установлено, что паводки на территории городской агломерации Улан-Батора отмечались в 1778, 1915, 1966, 1982, 2000, 2003, 2004, 2009, 2015, 2016, 2018, 2019 и 2020 гг. По информационным источникам Международного движения Красного Креста и Красного Полумесяца в 2009 г. с 16 по 26 июля в результате наводнения погибли 26 человек¹. Прохождения крупных паводковых вод в столице Монголии случались 20 июня 2015 г. и 21 июля 2016 г. Следствием природной

¹ DREF operation final report 2010 // Ifrc.org. [Электронный ресурс]. URL: <https://www.ifrc.org/docs/appeals/09/MDRMN002FR.pdf>. (12.08.2021).

катастрофы в 2019 г. снова стали человеческие жертвы – погибли 12 человек², в 2020 г. в результате наводнения погибли 8 человек³. По причине недостаточности информации у нас нет возможности разделить паводковые потоки на водные и грязекаменные, однако на основании морфометрических параметров и характеристик выпадения атмосферных осадков мы предполагаем, что грязекаменные потоки (сели) имели место. Целью данного исследования является морфометрический анализ рельефа и оценка предрасположенности водосборных бассейнов к формированию паводковых потоков на территории города Улан-Батора.

Материалы и методы исследований

Геологические условия района исследований. Район Улан-Баторской агломерации находится в центре Азиатского континента (рис. 1). Исследуемая территория относится к Центрально-Хэнтэйской горно-складчатой области Хэнтэйской горной провинции – области

преимущественно новейших сводово-глыбовых поднятий.

В геологическом строении исследуемого района представлены коренные отложения девона (D₁₋₂ и D₂₋₃) – метаморфизованные песчаники, алевролиты, туфопесчаники, туф-фиты; отложения юры (J₂₋₃) – граниты, гранит-порфиры с биотитом, мусковит; осадочные отложения карбона (C₁₋₂ и C₂₋₃), сложенные метаморфизованными песчаниками, филлитовыми сланцами, алевролитами, и отложения мела (K₁) – песчаники, алевролиты, конгломераты, гравелиты. Рыхлые неоген-четвертичные отложения (N_{2-Q}) представлены глиной, галькой, песками, супесью и суглинком различного генезиса. В конусах выноса наблюдаются глыбовый материал, дресва, щебень, слабосцементированные брекчии [14].

Геоморфологические условия района исследований. По морфогенетическому признаку на исследуемой территории выделяются денудационно-тектонические, структурно-денудационные и аккумулятивные типы рельефа [14]. Территория Улан-Баторской агломерации

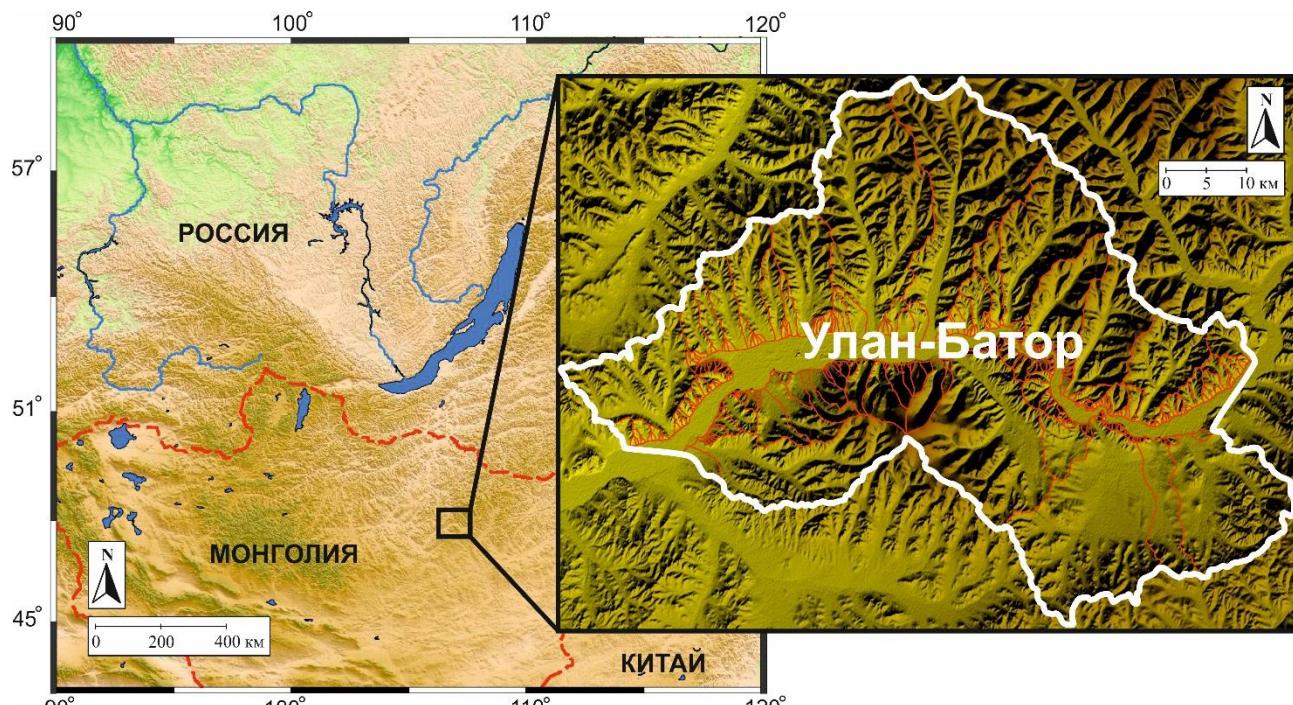


Рис. 1. Географическое положение территории
Fig. 1. Geographical location of the territory

² Mongolia – floods in Ulaanbaatar and Töv Province leave 12 dead // Floodlist.com. [Электронный ресурс]. URL: <https://floodlist.com/asia/mongolia-flooding-june-2019>. (12.08.2021).

³ Mongolia – floods leave 8 dead, 2,300 homes damaged // Floodlist.com. [Электронный ресурс]. URL: <https://floodlist.com/asia/mongolia-floods-july-2020>. (12.08.2021).



располагается в районах долинных комплексов, предгорных шлейфов и конусов выноса горного обрамления. Наиболее удобные для освоения территории сложены рыхлыми аллювиально-делювиально-пролювиальными отложениями неоген-четвертичного возраста. Горные и предгорные территории поставляют продукты выветривания горных пород в русла временных водотоков и речных долин, формируя конусы выноса.

Климат. Климат территории резко континентальный, характеризуется суворой и холодной зимой, небольшим количеством осадков и большими суточными и сезонными колебаниями температуры [15]. Улан-Батор является одной из самых холодных столиц в мире, среднегодовая температура здесь составляет $-0,7^{\circ}\text{C}$. Среднегодовое количество осадков – 200–250 мм, годовое распределение неравномерное [16–18], основное количество выпадает в теплый период года с мая по сентябрь, что составляет около 89 % от среднего годового объема, месячный же максимум составляет 227 мм (июнь 1967 г.), суточный максимум – 91 мм (сентябрь 1997 г.).

Анализ дождевых осадков за период 2010–2014 гг. по метеостанциям Алтан-Булаг, Буан-Угха, Монгун-Морт и Улан-Батор показывает их неравномерное распределение. Так, например, количество дней с осадками не менее 10 мм в сутки составило от 10 дней в 2010 г. и до 21 дня в 2013 г.; с осадками не менее 20 мм в сутки – от 3 дней в 2010 г. и до 6

дней в 2011 и 2013 гг.; с осадками не менее 30 мм в сутки – от 1 до 2 дней (рис. 2). Максимальное суточное количество осадков за этот период составило 85,3 мм 7 июля 2014 г. по данным метеостанции Монгун-Морт, что более чем в два раза превышает суточные максимумы 2010–2013 гг.

Основой для получения морфологических параметров водосборных бассейнов Улан-Баторской агломерации являлись топографическая карта масштаба 1:100000 и цифровая модель рельефа (SRTM-снимки с разрешением 90 м) исследуемой территории.

Результаты исследований

Морфометрический анализ водосборных бассейнов Улан-Баторской агломерации осуществлялся на основе их морфологических параметров. По имеющемуся картографическому материалу были выделены водосборные бассейны и водотоки, базисом эрозии которых является р. Туул. Выделенные водотоки и водосборы представляют собой цифровые линии и полигоны, вынесенные в качестве электронных слоев в геоинформационных системах MapInfo и Global Mapper, где осуществлялось их последующее редактирование. Эти программные комплексы позволяют осуществлять необходимые манипуляции с количественными данными выбранных элементов – водотоков, бассейнов – и считыванием данных с цифровой модели рельефа в автоматическом режиме (рис. 3).

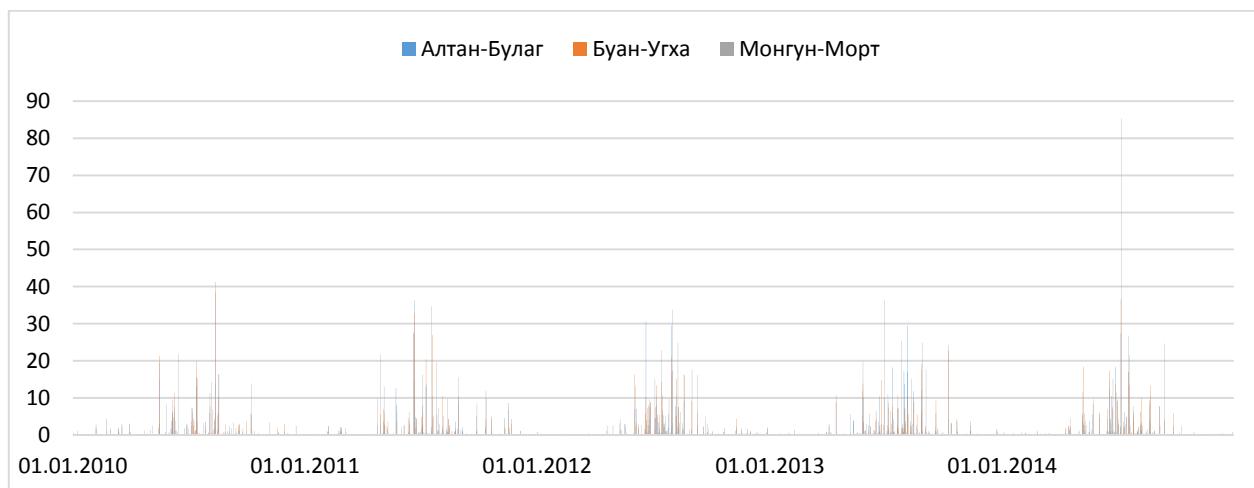


Рис. 2. Суточное количество осадков в районе г. Улан-Батора (1306 м) по данным метеостанций Алтан-Булаг, Буан-Угха, Монгун-Морт в период с 1 января 2010 г. по 31 декабря 2014 г.

Fig. 2. Daily amount of precipitation in the Ulan-Bator area (1306 m) according to the data of AltanBulag, Byan-Ukhaa, MongunMort weather stations in the period from January 1, 2010 to December 31, 2014

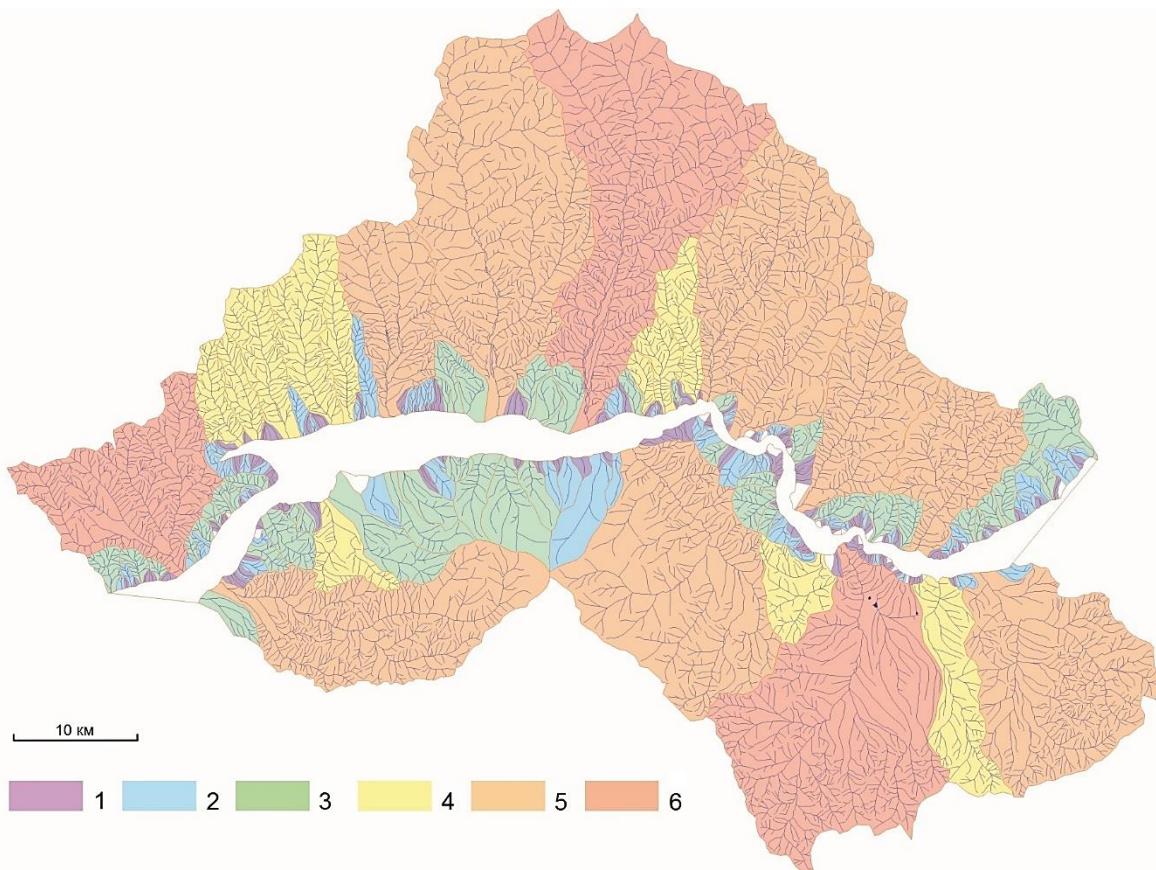


Рис. 3. Ранжирование водосборных бассейнов по порядку:

1–6 – порядок водосборов по Хортону

Fig. 3. Ranking of catchment basins in order:

1–6 – catchment order according to Horton

Для исследуемой территории выделено 303 водосборных бассейна. По наличию дренажной сети бассейны разделены по таксономическому уровню методом Р. Хортона [19]. С использованием данного метода выделенные водосборные бассейны ранжируются от 1 до 6 порядков (см. рис. 3).

Далее в ходе исследования для каждого бассейна были получены различные морфометрические показатели, характеризующие геометрию бассейна, дренажную сеть, рельеф.

Геометрия бассейна. К этой группе относятся параметры, характеризующие количественные показатели бассейнов, отражающие их геометрию: длина, ширина, площадь, периметр и форма. Данные длины, ширины, площади и периметра получены по оцифрованным картам в программе MapInfo. Расчетный размер формы бассейнов R_c определяется по формуле

$$R_c = 12,57 \cdot (A / P^2)^4;$$

где A – площадь бассейна, км^2 ; P – периметр бассейна, км .

Структура дренажной сети. В эту группу включены параметры, характеризующие дренажную сеть бассейнов: протяженность водотоков, густота и глубина эрозионного расчленения, частота водных потоков в бассейне.

Данные общей протяженности водотоков в бассейне получены в результате сложения длин всех водотоков в каждом из исследуемых бассейнов.

Густота эрозионного расчленения K , $\text{км}/\text{км}^2$, представляет собой соотношение суммарной длины водотоков в бассейне L , км , и его площади A , км^2 [20]:

$$K = L / A.$$

Глубина эрозионного расчленения H (высота бассейна), м , определяется как разность

⁴Miller V. C. Quantitative geomorphic study of drainage basin characteristics in the Clinch Mountain area, Virginia and Tennessee: technical report. New York: Columbia University, 1953.



между абсолютными максимальными и минимальными отметками в пределах водосборного бассейна H_{\max} и H_{\min} , м:

$$H = H_{\max} - H_{\min}.$$

Частота водотоков в бассейне F_s определяется соотношением числа водотоков всех порядков $\sum N_u$, ед., и площади бассейна A , км^2 [21]:

$$F_s = (\sum N_u) / A.$$

Характер рельефа. Данная группа включает в себя показатели, которые характеризуют особенности рельефа территории: высота, средний уклон бассейна, порядок водотока по Хортону, расчетный коэффициент рельефа, коэффициент Мелтона.

Высота и средний уклон были получены путем обработки информации цифровых моделей рельефа. Определение порядков водотоков осуществлялось по топографической карте.

Коэффициент рельефа R_h определяется соотношением глубины эрозионного расчленения H , км, и его длины L , км [20]:

$$R_h = H / L.$$

Расчет коэффициента Мелтона M представляет собой соотношение глубины эрозионного расчленения H , км, и его площади A , км^2 [22, 23]:

$$M = H / A^{0.5}.$$

Показатель коэффициента Мелтона отражает условия развития флювиальных процессов разного типа – наводнений, водокаменных и селевых потоков. По данному коэффициенту для различных регионов выделены определенные закономерности в развитии флювиальных процессов. Более высокие показатели коэффициента Мелтона характерны для водосборных бассейнов, в которых могут формироваться селевые потоки.

Авторами была проанализирована форма бассейна (округлая, вытянутая). При значении коэффициента округлости, близком к 1, форма бассейна соответствует кругу. В водосборном бассейне круглой формы время добегания для водотоков примерно одинаковое, что формирует в основном русле кратковременный водный поток с большим расходом. В вытянутом бассейне время добегания разное, что формирует более продолжительный по времени водный поток с меньшим расходом.

Синтетические карты. По результатам представленных выше расчетов построены синтетические карты, отражающие морфометрические параметры исследуемых бассейнов. Карты условно разделены на группы, характеризующие определенные морфометрические параметры.

Первая группа характеризует параметры геометрии бассейнов, такие как длина, ширина, площадь, периметр и форма бассейнов.

Для исследуемой территории Улан-Баторской агломерации по выполненной методике установлено, что длина бассейнов варьирует в значительных пределах. Длина самого протяженного бассейна составляет 33,68 км, самый короткого – 0,4 км. Средняя ширина водосборных бассейнов изменяется в диапазоне от 0,17 до 11,18 км. Площади бассейнов на исследуемой территории варьируют от мелких водосборов с минимальной площадью 0,09 км^2 до крупных водосборов с площадью до 305,38 км^2 . Периметр бассейнов меняется от 1,38 до 109,83 км.

Показатель формы бассейна демонстрирует геометрию бассейна в плане и отражает его способность концентрировать и формировать значительный расход потока воды за короткое время или наличие низких значений расхода за длительный промежуток времени. Округлый бассейн способен формировать поверхностный водоток с высоким расходом воды за короткое время. Полученные значения варьируют от 0,06 до 0,85, среднее значение – 0,53. На исследуемой территории выделяется 27 бассейнов окружной и 40 бассейнов вытянутой формы. Показатель вытянутости бассейна демонстрирует возможность формирования низких расходов воды в течение длительного времени (рис. 4).

Вторая группа характеризует параметры дренажной сети бассейнов. В нее включены протяженность водотоков, густота эрозионного расчленения (плотность дренажа), глубина эрозионного расчленения, частота водотоков в бассейне.

Общая длина всех водотоков в бассейне (протяженность) в зависимости от изрезанности, площади бассейнов и плотности водотоков меняется от 0,26 до 701,86 км. Густота эрозионного расчленения определяется со-

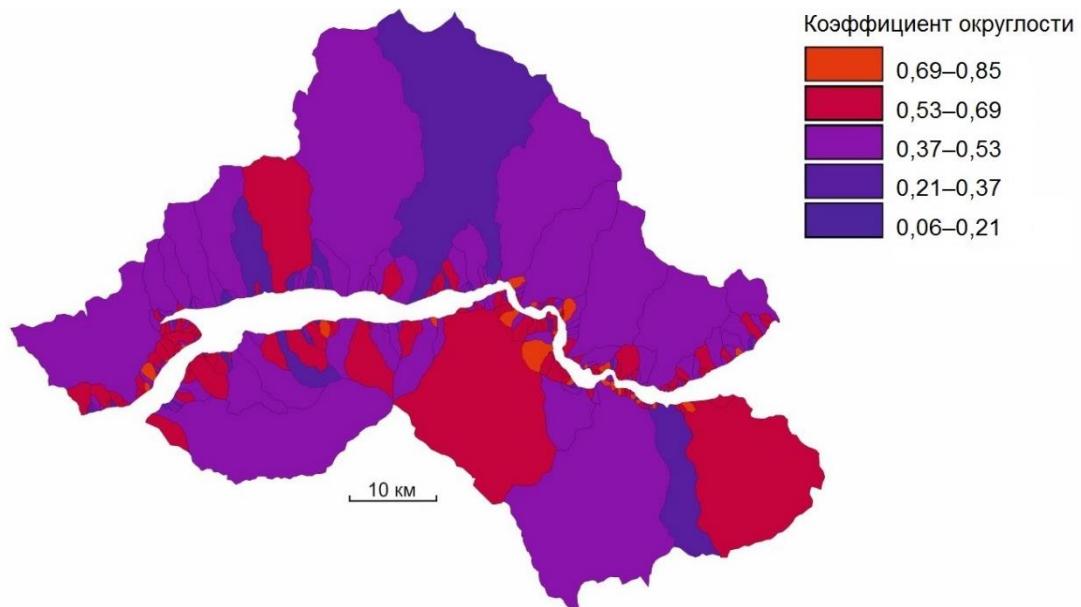


Рис. 4. Карта-схема коэффициента округлости водосборных бассейнов
Fig. 4. Schematic map of catchment basin roundness ratio

отношением суммарной длины водотоков водосборного бассейна к площади этого водосборного бассейна и характеризует плотность развития эрозионной сети в бассейне. На исследуемой территории она варьирует от 0,64 до 4,65 км/км², среднее значение густоты эрозионного расчленения на исследуемой территории составляет 2,47 км/км² (рис. 5, а).

Глубина эрозионного расчленения водосборного бассейна определяется превыше-

нием максимальной высоты над минимальной в одном бассейне. Она является одним из основных показателей, характеризующих энергетический потенциал рельефа. Чем больше глубина эрозионного расчленения, тем больше энергетический потенциал. В результате анализа было установлено, что глубина расчленения водосборных бассейнов изменяется от 42 до 1026 м.

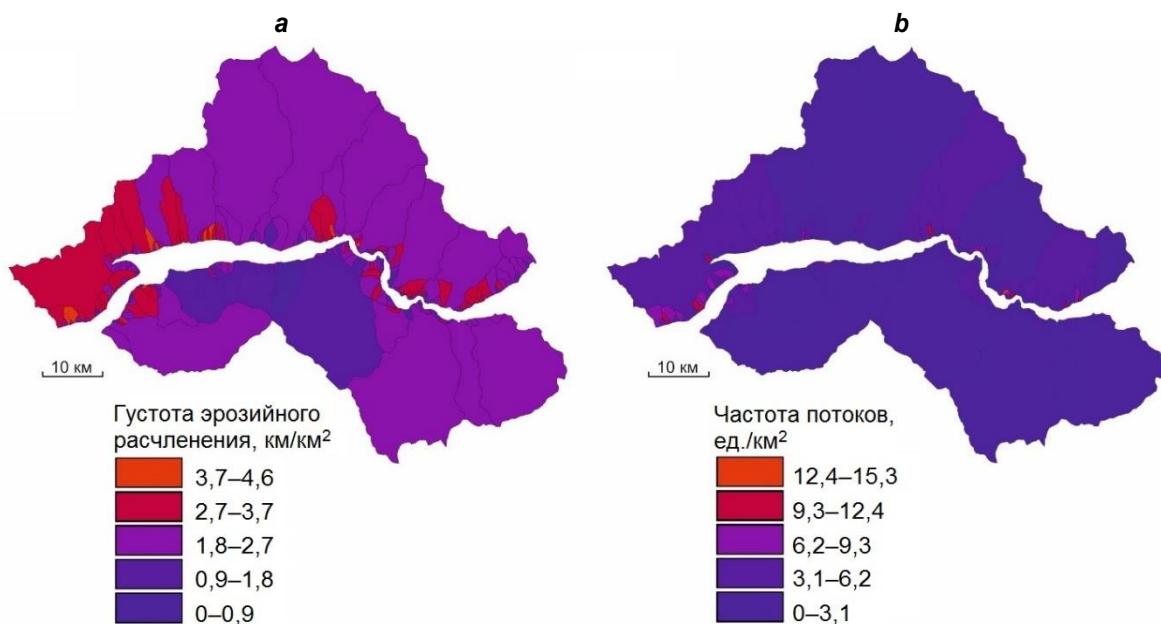


Рис. 5. Карты-схемы густоты эрозионного расчленения (а) и частоты потоков (б) водосборных бассейнов
Fig. 5. Schematic maps of erosion dissection density (a) and flow frequency (b) of catchment basins



Частота водных потоков характеризует отношение числа водотоков всех порядков к площади водосбора. Высокие показатели частоты водотоков предопределены низкими инфильтрационными свойствами горных пород, горным рельефом местности и редкой растительностью либо ее отсутствием. Этот показатель для территории столицы Монголии и прилегающих территорий в границах агломерации изменяется от 0,21 до 15,23 (рис. 5, б).

Третья группа характеризует параметры рельефа бассейнов и включает в себя такие показатели, как высота, средний уклон бассейна, порядок водотока по Хортону и коэффициент рельефа, а также коэффициент Мелтона.

Для района Улан-Баторской агломерации характерно наличие горного обрамления, поэтому высота водосборных бассейнов достигает максимального значения в 2257 м. При этом средний показатель уклона бассейна варьирует от 1,19 до 21,68°. Как было указано выше, по определению методом Хортону на исследуемой территории выделяются бассейны от 1 до 6 порядков.

В ходе исследования был произведен расчет показателя коэффициента рельефа водосборного бассейна – одного из важных показателей для оценки возможности формирования

ния флювиальных процессов в локальном водосборе. Данный показатель для исследуемой территории меняется в диапазоне от 0,02 до 0,44 (рис. 6, а).

Использование коэффициента Мелтона в морфометрическом анализе позволяет определить преобладающее развитие флювиальных процессов в бассейне. По полученным данным для исследуемой территории показатель Мелтона водосборных бассейнов достаточно низок: среднее значение коэффициента Мелтона равно 0,25; максимальное значение – 0,65; минимальное значение – 0,02 (рис. 6, б).

Обсуждение полученных результатов

Обработка данных цифровой модели рельефа и использование геоинформационных технологий дает возможность автоматизировать работы по получению морфометрических параметров водосборных бассейнов на исследуемой территории, что позволяет значительно сократить время обработки морфометрических параметров водосборов, а также рассматривать большое количество объектов исследования (водосборных бассейнов), вести расчеты для большой по площади территории.

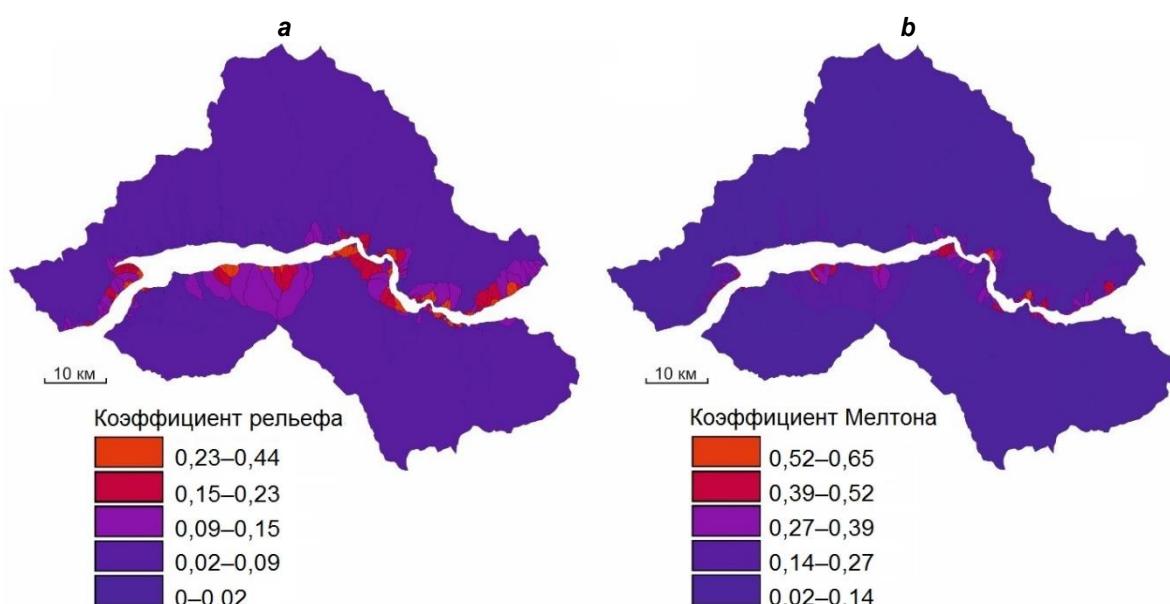


Рис. 6. Карты-схемы коэффициента рельефа (а) и коэффициента Мелтона (б) водосборных бассейнов
Fig. 6. Schematic maps of a terrain relief coefficient (a) and Melton coefficient (b) of catchment basins



Статистическая обработка количественных морфометрических данных водосборных бассейнов, их анализ и группировка очень важны при оценке условий формирования экстремальных геологических процессов флювиального генезиса. Полученная данным путем специальная информация позволяет оценить природный потенциал анализируемой территории для формирования тех или иных флювиальных процессов.

Карты параметров геометрии бассейнов демонстрируют предрасположенность части водосборных бассейнов к концентрации водных потоков и способности за короткое время формировать высокие расходы потоков воды. В округлых бассейнах за короткий период времени могут сформироваться водные потоки с большим, чем в вытянутых бассейнах, расходом воды. В ходе исследования выделено 17 округлых бассейнов. Именно для них характерно формирование катастрофически быстрых событий: в короткий промежуток времени на этой территории возможны наводнения и сели. По 63 бассейнам установлены параметры среднего значения округлости. 199 бассейнов, в свою очередь, имеют вытянутую форму и способны стабильно долгое время удерживать низкие расходы водных потоков. Такое долгое по времени движение потоков объясняется тем, что бассейны имеют короткие притоки и длинное основное русло. В таких бассейнах с большей долей вероятности будут формироваться подтопления долин и проявляться различные эрозионные формы – овраги, промоины.

Характеристика дренажной сети и ее количественные морфометрические параметры очень важны при оценке формирования поверхностных водотоков, поскольку водная составляющая является главным фактором при формировании флювиальных процессов. Расход воды, время формирования потока, инфильтрационные параметры зоны аэрации бассейнов – все эти показатели отражаются в особенностях проявления процессов и в их динамике. Анализ электронных карт в группе «параметры дренажной сети» показал, что каждый водосборный бассейн имеет свои особенности формирования поверхностного водостока. Формирование потоков происхо-

дит в разных геолого-геоморфологических условиях. Области с максимальной густотой расчленения соответствуют участкам денудационно-аккумулятивного и денудационно-tektonического рельефа с глубиной расчленения 200–500 м, а также мощностью рыхлых делювиально-пролювиальных отложений 10–30 м и мощностью озерно-аллювиальных-пролювиальных отложений до 100–120 м. Глубина расчленения рельефа отражает морфометрические характеристики бассейнов, определяющие эрозионный потенциал рельефа – один из главных факторов развития линейной эрозии.

Отражение инфильтрационных свойств грунтов присутствует в показателе частоты водных потоков. Частота водных потоков выше в тех бассейнах, поверхность которых слабо впитывает в себя воду. В таких условиях в каждом, даже слабовыраженном понижении, формируется временное русло. Преvalируют процессы поверхностного стока, сток рассредоточен, отмечаются большие потери водной составляющей. В бассейнах с низким показателем частоты водных потоков формируется больший по объему и направленности поверхностный сток. Низкие показатели свойственны участкам, сложенным горными породами с большей инфильтрационной способностью.

Группа, объединяющая показатели, характеризующие особенности рельефа местности, отражает предрасположенность к формированию водных потоков и способность формировать потоки разной плотности – от водных до грязекаменных (сели). Из литературных источников известно, что для анализируемых территорий свойственно формирование флювиальных процессов, если коэффициент Мелтона выше 0,3. Чем выше данный показатель, тем выше вероятность формирования водных потоков большей плотности. Исходя из полученных количественных показателей коэффициента Мелтона, для территории Улан-Баторской агломерации водосборы разделены на группы с разной потенциальной предрасположенностью формирования потоков: паводки и водные потоки, водокаменные и грязекаменные потоки (сели).



Заключение

Использование методики анализа морфометрических характеристик водосборных бассейнов на основе обработки цифровой модели рельефа с применением геоинформационных технологий обеспечивает получение необходимого объема достоверной количественной информации. Полученные количественные данные дают возможность проводить ранжирование водосборных бассейнов исследуемой территории по различным морфометрическим параметрам, определять природный потенциал водосборного бассейна для формирования преобладающих типов флювиальных процессов.

Установленные морфометрические особенности водосборных бассейнов позволяют составлять и наглядно демонстрировать графические отчеты, карты, схемы, специализированные крупномасштабные планы и разномасштабные карты, просчитывать сценарии развития поверхностного стока, обоснованно составлять оценки степени опасности проявления экстремальных геологических процессов на освоенных городских территориях.

В ходе проведенного исследования для территории Улан-Баторской агломерации ав-

торами впервые получены количественные параметры морфометрии водосборных бассейнов и построен ряд специализированных аналитических карт, дающих представление о потенциале исследуемой территории для формирования групп флювиальных процессов. Установлено, что в отдельных водосборных бассейнах исследуемой территории возможно формирование крупных паводков и развитие опасных селевых потоков.

Специализированные аналитические карты, построенные на основе морфометрических параметров рельефа, позволяют дать оценку предрасположенности территории к формированию быстротекущих катастрофических процессов, связанных с прохождением паводочного стока в период ливневых осадков, как затяжных, так и кратковременных. Кроме того, полученная база данных морфометрических показателей исследуемой территории в будущем может являться основой для моделирования и рассмотрения разных сценариев прогнозного развития внутриконтинентальных районов в условиях меняющегося климата, а именно частоты и количества атмосферных осадков.

Список источников

1. Jonkman S. N., Penning-Rowsell E. Human instability in floods flows // Journal of the American Water Resources Association. 2008. Vol. 44. Iss. 5. P. 1208–1218. <https://doi.org/10.1111/j.1752-1688.2008.00217.x>.
2. Marchi L., Borga M., Preciso E., Gaume E. Characterisation of selected extreme flash floods in Europe and implications for flood risk management // Journal of Hydrology. 2010. Vol. 394. Iss. 1-2. P. 118–133. <https://doi.org/10.1016/j.jhydrol.2010.07.017>.
3. Ahmadalipour A., Moradkhani H. A data-driven analysis of flash flood hazard, fatalities, and damages over the CONUS during 1996–2017 // Journal of Hydrology. 2019. Vol. 578. P. 124106. <https://doi.org/10.1016/j.jhydrol.2019.124106>.
4. Diakakis M. A method for flood hazard mapping based on basin morphometry: application in two catchments in Greece // Natural Hazards. 2011. Vol. 56. Iss. 3. P. 803–814. <https://doi.org/10.1007/s11069-010-9592-8>.
5. Bathrellos G. D., Karymbalis E., Skilodimou H. D., Gaki-Papanastassiou K., Baltas E. A. Urban flood hazard assessment in the basin of Athens Metropolitan city, Greece // Environmental Earth Sciences. 2016. Vol. 75. Iss. 4. P. 319. <https://doi.org/10.1007/s12665-015-5157-1>.
6. Meraj G., Romshoo S. A., Yousuf A. R., Altaf S., Altaf F. Assessing the influence of watershed characteris-
- tics on the flood vulnerability of Jhelum basin in Kashmir Himalaya // Natural Hazards. 2015. Vol. 77. Iss. 1. P. 153–175. <https://doi.org/10.1007/s11069-015-1605-1>.
7. Angillieri M. Y. E. Morphometric analysis of Colan-güil river basin and flash flood hazard, San Juan, Argentina // Environmental Geology. 2008. Vol. 55. Iss. 1. P. 107–111. <https://doi.org/10.1007/s00254-007-0969-2>.
8. Parveen R., Kumar U., Singh V. K. Geomorphometric characterization of Upper South Koel basin, Jharkhand: a remote sensing & GIS approach // Journal of Water Resource and Protection. 2012. Vol. 4. Iss. 12. P. 1042–1050. <https://doi.org/10.4236/jwarp.2012.412120>.
9. Waikar M. L., Nilawar A. P. Morphometric analysis of a drainage basin using geographical information system: a case study // International Journal of Multidisciplinary and Current Research. 2014. Vol. 2. P. 179–184.
10. Kleinen T., Petschel-Held G. Integrated assessment of changes in flooding probabilities due to climate change // Climatic Change. 2007. Vol. 81. Iss. 3-4. P. 283–312. <https://doi.org/10.1007/s10584-006-9159-6>.
11. Halmstad A., Najafi M. R., Moradkhani H. Analysis of precipitation extremes with the assessment of regional climate models over the Willamette River basin, USA // Hydrological Processes. 2013. Vol. 27. Iss. 18. P. 2579–2590. <https://doi.org/10.1002/hyp.9376>.



12. Kundzewicz Z. W., Kanae S., Seneviratne S. I., Handmer J., Nicholls N., Peduzzi P., et al. Flood risk and climate change: global and regional perspectives // *Hydrological Sciences Journal*. 2014. Vol. 59. Iss. 1. P. 1–28. <https://doi.org/10.1080/02626667.2013.857411>.
13. Oyunbaatar D. Floods in Mongolia // Restec.or.jp. [Электронный ресурс]. URL: https://www.restec.or.jp/geoss_ap3/pdf/day2/WG/WG2/Short_Country_Reports/08_Mongolia.pdf. (12.08.2021).
14. Семинский К. Ж., Леви К. Г., Джурек В. И., Козырева Е. А., Саньков В. А., Турутанов Е. Х. Опасные геологические процессы и прогнозирование чрезвычайных ситуаций природного характера на территории Центральной Монголии / отв. ред. Д. П. Гладкочуб. Иркутск: Изд-во ИГУ, 2017. 331 с.
15. Sato T., Kimura F., Kitoh A. Projection of global warming onto regional precipitation over Mongolia using a regional climate model // *Journal of Hydrology*. 2007. Vol. 333. Iss. 1. P. 144–154. <https://doi.org/10.1016/j.jhydrol.2006.07.023>.
16. Saizen I., Tsutsumida N. The rapid development of settlements in flood-prone areas in peri-urban Ulaanbaatar, Mongolia: monitoring and spatial analysis using VHR satellite imageries // *Land use management in disaster risk reduction* / eds. M. Banba, R. Shaw. Tokyo: Springer, 2017. P. 137–148.
17. Ashley S. T., Ashley W. S. Flood fatalities in the United States // *Journal of Applied Meteorology and Climatology*. 2008. Vol. 47. Iss. 3. P. 805–818. <https://doi.org/10.1175/2007JAMC1611.1>.
18. Khishigjargal M., Dulamsuren C., Leuschner H. H., Leuschner C., Hauck M. Climate effects on inter- and intra-annual larch stemwood anomalies in the Mongolian forest-steppe // *Acta Oecologica*. 2014. Vol. 55. P. 113–121. <https://doi.org/10.1016/j.actao.2013.12.003>.
19. Horton R. E. Erosional development of streams and their drainage basins; hydrophysical approach to quantitative morphology // *Bulletin of the Geological Society of America*. 1945. Vol. 56. Iss. 3. P. 275–370. [https://doi.org/10.1130/0016-7606\(1945\)56\[275:EDOSAT\]2.0.CO;2](https://doi.org/10.1130/0016-7606(1945)56[275:EDOSAT]2.0.CO;2).
20. Horton R. E. Drainage-basin characteristics // *Eos, Transactions, American Geophysical Union*. 1932. Vol. 13. Iss. 1. P. 350–361. <https://doi.org/10.1029/TR013i001p00350>.
21. Schumm S. A. Evolution of drainage systems and slopes in badlands at Perth Amboy, New Jersey // *Bulletin of the Geological Society of America*. 1956. Vol. 67. Iss. 5. P. 597–646. [https://doi.org/10.1130/0016-7606\(1956\)67\[597:EDOSAS\]2.0.CO;2](https://doi.org/10.1130/0016-7606(1956)67[597:EDOSAS]2.0.CO;2).
22. Melton M. A. The geomorphic and paleoclimatic significance of alluvial deposits in southern Arizona // *The Journal of Geology*. 1965. Vol. 73. Iss. 1. P. 1–38.
23. Auzina L. I., Parshin A. V. System-integrated GIS-based approach to estimating hydrogeological conditions of oil-and-gas fields in Eastern Siberia // *IOP Conference Series: Earth and Environmental Science*. 2016. Vol. 33. P. 012060. <https://doi.org/10.1088/1755-1315/33/1/012060>.

References

1. Jonkman S. N., Penning-Rowsell E. Human instability in floods flows. *Journal of the American Water Resources Association*. 2008;44(5):1208-1218. <https://doi.org/10.1111/j.1752-1688.2008.00217.x>.
2. Marchi L., Borga M., Preciso E., Gaume E. Characterisation of selected extreme flash floods in Europe and implications for flood risk management. *Journal of Hydrology*. 2010;394(1-2):118-133. <https://doi.org/10.1016/j.jhydrol.2010.07.017>.
3. Ahmadalipour A., Moradkhani H. A data-driven analysis of flash flood hazard, fatalities, and damages over the CONUS during 1996–2017. *Journal of Hydrology*. 2019;578:124106. <https://doi.org/10.1016/j.jhydrol.2019.124106>.
4. Diakakis M. A method for flood hazard mapping based on basin morphometry: application in two catchments in Greece. *Natural Hazards*. 2011;56(3):803-814. <https://doi.org/10.1007/s11069-010-9592-8>.
5. Bathrellos G. D., Karymbalis E., Skilodimou H. D., Gaki-Papanastassiou K., Baltas E. A. Urban flood hazard assessment in the basin of Athens Metropolitan city, Greece. *Environmental Earth Sciences*. 2016;75(4):319. <https://doi.org/10.1007/s12665-015-5157-1>.
6. Meraj G., Romshoo S. A., Yousuf A. R., Altaf S., Altaf F. Assessing the influence of watershed characteristics on the flood vulnerability of Jhelum basin in Kashmir Himalaya. *Natural Hazards*. 2015;77(1):153-175. <https://doi.org/10.1007/s11069-015-1605-1>.
7. Angillieri M. Y. E. Morphometric analysis of Colangüil river basin and flash flood hazard, San Juan, Argentina. *Environmental Geology*. 2008;55(1):107-111. <https://doi.org/10.1007/s00254-007-0969-2>.
8. Parveen R., Kumar U., Singh V. K. Geomorphometric characterization of Upper South Koel basin, Jharkhand: a remote sensing & GIS approach. *Journal of Water Resource and Protection*. 2012;4(12):1042-1050. <https://doi.org/10.4236/jwarp.2012.412120>.
9. Waikar M. L., Nilawar A. P. Morphometric analysis of a drainage basin using geographical information system: a case study. *International Journal of Multidisciplinary and Current Research*. 2014;2:179-184.
10. Kleinen T., Petschel-Held G. Integrated assessment of changes in flooding probabilities due to climate change. *Climatic Change*. 2007;81(3-4):283-312. <https://doi.org/10.1007/s10584-006-9159-6>.
11. Halmstad A., Najafi M. R., Moradkhani H. Analysis of precipitation extremes with the assessment of regional climate models over the Willamette River basin, USA. *Hydrological Processes*. 2013;27(18):2579-2590. <https://doi.org/10.1002/hyp.9376>.
12. Kundzewicz Z. W., Kanae S., Seneviratne S. I., Handmer J., Nicholls N., Peduzzi P., et al. Flood risk and climate change: global and regional perspectives. *Hydrological Sciences Journal*. 2014;59(1):1-28. <https://doi.org/10.1080/02626667.2013.857411>.



13. Oyunbaatar D. *Floods in Mongolia*. Available from: https://www.restec.or.jp/geoss_ap3/pdf/day2/WG/WG2/Short_Country_Reports/08_Mongolia.pdf. [Accessed 12th August 2021].
14. Seminsky K. Zh., Levi K. G., Dzhurik V. I., Kozyreva E. A., San'kov V. A., Turutanov E. Kh. *Hazardous geological processes and forecasting of natural disasters in the territory of Central Mongolia*. Irkutsk: Irkutsk State University; 2017. 331 p. (In Russ.).
15. Sato T., Kimura F., Kitoh A. Projection of global warming onto regional precipitation over Mongolia using a regional climate model. *Journal of Hydrology*. 2007;333(1): 144-154. <https://doi.org/10.1016/j.jhydrol.2006.07.023>.
16. Saizen I., Tsutsumida N. The rapid development of settlements in flood-prone areas in peri-urban Ulaanbaatar, Mongolia: monitoring and spatial analysis using VHR satellite imageries. In: Banba M., Shaw R. (eds.). *Land use management in disaster risk reduction*. Tokyo: Springer; 2017. p.137-148.
17. Ashley S. T., Ashley W. S. Flood fatalities in the United States. *Journal of Applied Meteorology and Climatology*. 2008;47(3):805-818. <https://doi.org/10.1175/2007JAMC1611.1>.
18. Khishigjargal M., Dulamsuren C., Leuschner H. H., Leuschner C., Hauck M. Climate effects on inter- and intra-annual larch stemwood anomalies in the Mongolian forest-steppe. *Acta Oecologica*. 2014;55:113-121. <https://doi.org/10.1016/j.actao.2013.12.003>.
19. Horton R. E. Erosional development of streams and their drainage basins; hydrophysical approach to quantitative morphology. *Bulletin of the Geological Society of America*. 1945;56(3):275-370. [https://doi.org/10.1130/0016-7606\(1945\)56\[275:EDOSAT\]2.0.CO;2](https://doi.org/10.1130/0016-7606(1945)56[275:EDOSAT]2.0.CO;2).
20. Horton R. E. Drainage-basin characteristics. *Eos, Transactions, American Geophysical Union*. 1932;13(1): 350-361. <https://doi.org/10.1029/TR013i001p00350>.
21. Schumm S. A. Evolution of drainage systems and slopes in badlands at Perth Amboy, New Jersey. *Bulletin of the Geological Society of America*. 1956;67(5):597-646. [https://doi.org/10.1130/0016-7606\(1956\)67\[597:EODSAS\]2.0.CO;2](https://doi.org/10.1130/0016-7606(1956)67[597:EODSAS]2.0.CO;2).
22. Melton M. A. The geomorphic and paleoclimatic significance of alluvial deposits in southern Arizona. *The Journal of Geology*. 1965;73(1):1-38.
23. Auzina L. I., Parshin A. V. System-integrated GIS-based approach to estimating hydrogeological conditions of oil-and-gas fields in Eastern Siberia. *IOP Conference Series: Earth and Environmental Science*. 2016;33: 012060. <https://doi.org/10.1088/1755-1315/33/1/012060>.

Информация об авторах / Information about the authors



Козырева Елена Александровна,
доктор геолого-минералогических наук,
заместитель директора по научной работе,
Институт земной коры СО РАН,
г. Иркутск, Россия,
kozireva@crust.irk.ru,
<https://orcid.org/000-002-0568-65-61>.

Elena A. Kozyreva,
Dr. Sci. (Geol. & Mineral.),
Deputy Director for Research,
Institute of the Earth's Crust, Siberian Branch of the Russian Academy of Sciences,
Irkutsk, Russia,
kozireva@crust.irk.ru,
<https://orcid.org/000-002-0568-65-61>.



Рыбченко Артем Александрович,
кандидат геолого-минералогических наук,
старший научный сотрудник Лаборатории инженерной геологии и геоэкологии,
Институт земной коры СО РАН,
г. Иркутск, Россия,
rybchenk@crust.irk.ru,
<https://orcid.org/0000-0003-2615-8423>.

Artem A. Rybchenko,
Cand. Sci. (Geol. & Mineral.),
Senior Researcher, Laboratory of Engineering Geology,
Institute of the Earth's Crust, Siberian Branch of the Russian Academy of Sciences,
Irkutsk, Russia,
rybchenk@crust.irk.ru,
<https://orcid.org/0000-0003-2615-8423>.



Дэмбэрэл Содномсамбуу,
доктор геолого-минералогических наук,
академик Монгольской академии наук,
директор,
Институт астрономии и геофизики Монгольской академии наук,
г. Улан-Батор, Монголия,
demberel@iag.ac.mn,
<https://orcid.org/0000-0002-1023-0075>.

Sodhomsambuu Demberel,
Dr. Sci. (Geol. & Mineral.),
Academician of the Mongolian Academy of Sciences,
Director,
Institute of Astronomy and Geophysics, Mongolian Academy of Sciences,
Ulaanbaatar, Mongolia,
demberel@iag.ac.mn,
<https://orcid.org/0000-0002-1023-0075>.

Вклад авторов / Contribution of the authors

Публикация подготовлена совместно российско-монгольским коллективом. Полевые работы и сбор материала проведены совместно. Данные из средств массовой информации, а также климатические данные представлены монгольскими коллегами. Статистическая обработка, построение электронных карт и получение расчетных характеристик, аналитическая работа выполнены российскими коллегами.

The publication was prepared by a joint Russian-Mongolian team. Field work and collection of material were carried out jointly. Media information as well as climate data were provided by Mongolian colleagues. Russian colleagues performed statistical processing and electronic mapping, obtained design characteristics and carried out analytical work.

Конфликт интересов / Conflict of interests

Авторы заявляют об отсутствии конфликта интересов.

The authors declare no conflicts of interests.

Все авторы прочитали и одобрили окончательный вариант рукописи.

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

Информация о статье / Information about the article

Статья поступила в редакцию 03.08.2021; одобрена после рецензирования 12.10.2021; принятая к публикации 16.11.2021.

The article was submitted 03.08.2021; approved after reviewing 12.10.2021; accepted for publication 16.11.2021.



ГЕОЭКОЛОГИЯ

Научная статья

УДК 553.41

<https://doi.org/10.21285/2686-9993-2021-44-4-471-484>



Загрязнение бассейна реки Джелтулак-1 при россыпной золотодобыче (Амурская область)

Валентина Ивановна Радомская^a, Сергей Михайлович Радомский^b,
Александр Сергеевич Сегренев^c, Софья Яновна Кулик^d

^{a-c}Институт геологии и природопользования ДВО РАН, г. Благовещенск, Россия

^dРоссийский государственный педагогический университет им. А. И. Герцена, г. Санкт-Петербург, Россия

Автор, ответственный за переписку: Радомская Валентина Ивановна, radomskaya@ascnet.ru

Резюме. Целью представленного исследования являлось изучение влияния россыпной золотодобычи на природную среду. Объектом исследования служили природные и природно-техногенные геосистемы реки Джелтулак-1 в Амурской области. Содержания основных катионов и микроэлементов в пробах воды определяли атомно-эмиссионным и масс-спектральным методами. Содержание микро- и породообразующих элементов в донных отложениях, почвах устанавливали рентгенофлуоресцентным методом на рентгеновском спектрометре XRF-1800 (Shimadzu, Япония). Результаты проведенных исследований свидетельствуют о том, что содержание железа, марганца, меди, алюминия, ванадия, молибдена, ртути и ионов аммония превышает рыбохозяйственные нормативы в значительной части проб поверхностных вод. Установлено негативное влияние отстойников на качество воды в реке Джелтулак-1 ниже по течению вследствие дренажа дамб. Наибольшие концентрации растворенных форм ртути отмечены в воде отстойников. Валовое содержание мышьяка в пробах донных отложений и почв выше санитарно-гигиенических нормативов в 2,7–14,5 раза. Для ртути – самого опасного поллютанта – детально проработаны распределения среди биогенных компонентов геохимического ландшафта. Выполнено разделение ртутного загрязнения почв по формам нахождения ртути на свободную, физически сорбированную, хемосорбированную, сульфидную и изоморфную формы. Показано, что свободная форма характерна для свежих ртутных загрязнений из-за использования запрещенных технологических схем обогащения золотосодержащих песков методом амальгамации.

Ключевые слова: загрязнение бассейна реки Джелтулак-1, россыпная золотодобыча, Приамурье

Для цитирования: Радомская В. И., Радомский С. М., Сегренев А. С., Кулик С. Я. Загрязнение бассейна реки Джелтулак-1 при россыпной золотодобыче (Амурская область) // Науки о Земле и недропользование. 2021. Т. 44. № 4. С. 471–484. <https://doi.org/10.21285/2686-9993-2021-44-4-471-484>.

GEOECOLOGY

Original article

Contamination of the Dzheltulak-1 river basin under alluvial gold mining (the Amur region)

Valentina I. Radomskaya^a, Sergey M. Radomskiy^b,
Alexander S. Segrenev^c, Sofya Ya. Kulik^d

^{a-c}Institute of Geology and Nature Management, Far Eastern Branch
of the Russian Academy of Sciences, Blagoveshchensk, Russia

^dHerzen University, Saint Petersburg, Russia

Corresponding author: Valentina I. Radomskaya, radomskaya@ascnet.ru

Abstract. The purpose of the introduced research is to study the environmental impact of placer gold mining. The object of the study is natural and natural-man-made geosystems of the Dzheltulak-1 river located in the Amur region. The content of the main cations and microelements in water samples was determined by atomic emission and mass spectral methods.

© Радомская В. И., Радомский С. М., Сегренев А. С., Кулик С. Я., 2021



The content of micro- and rock-forming elements in bottom sediments and soils was determined by X-ray fluorescence using XRF-1800 X-ray spectrometer (Shimadzu, Japan). The results of the conducted studies indicate that the contents of iron, manganese, copper, aluminum, vanadium, molybdenum, mercury and ammonium ions exceed commercial fishery standards in a significant part of the surface water samples. It is found out that settlement ponds negatively affect the water quality in the river Dzheltulak-1 downstream due to the dam drainage. The highest concentrations of dissolved forms of mercury were noted in the water of the settlement ponds. The gross content of arsenic in the samples of bottom sediments and soils exceeds sanitary and hygienic standards by 2.7–14.5 times. The distributions of mercury as the most dangerous pollutant among the biogenic components of geochemical landscape were worked out in detail. Mercury contamination of soils was classified according to the forms of mercury occurrence: free, physically sorbed, chemisorbed, sulfide and isomorphic. It has been shown that the free form is characteristic of fresh mercury contamination due to the use of prohibited technological schemes for gold-bearing sands separation by the amalgamation method.

Keywords: pollution of the Dzheltulak-1 river basin, alluvial gold mining, Amur region

For citation: Radomskaya V. I., Radomskiy S. M., Segrenev A. S., Kulik S. Ya. Contamination of the Dzheltulak-1 river basin under alluvial gold mining (the Amur region). *Nauki o Zemle i nedropol'zovanie = Earth sciences and subsoil use.* 2021;44(4):471-484. (In Russ.). <https://doi.org/10.21285/2686-9993-2021-44-4-471-484>.

Введение

Реки Амурского бассейна богаты золотыми россыпями, и люди уже более столетия моют здесь золото [1]. На территории Амурской области добчу золота осуществляют более 60 предприятий. Несмотря на большое количество научных работ о воздействии золотодобычи на окружающую среду [2–7], комплексной оценки воздействия золотодобывающих предприятий на экосистемы речных бассейнов Амура до сих пор никем не проводилось. Опыт контролирующих организаций показывает, что в силу многочисленности артелей и удаленности районов работ организация постоянного контроля за качеством воды и состоянием водотоков, испытывающих воздействие золотых приисков, невозможна. В результате объективная картина влияния разработок золотоносных месторождений на водотоки отсутствует, а от внимания государства ускользают острые экологические, экономические и социальные проблемы, возникающие при золотодобыче. Кроме того, следует отметить, что многие отрабатываемые в настоящее время россыпные месторождения загрязнены ртутью в результате добычных работ прошлых лет [8]. Метод амальгамации, основанный на избирательном смачивании ртутью частиц золота, длительное время был обязательным звеном традиционных технологических схем обогащения золотосодержащих руд и песков. Несмотря на то что на сегодняшний день уже разработаны современные эффективные амальгамационные технологии, серийного оборудования для их осуществления в нашей стране так и не было

создано. Аппаратурное оформление носило, как правило, полукустарный характер. Стадия отпарки ртути из амальгамированного золота – одна из наиболее экологически опасных операций – осуществлялась чаще всего в печах без эффективной системы конденсации и улавливания паров ртути. В небольших артелях, не имеющих средств на закупку дорогостоящего обогатительного оборудования, не только амальгамацию, но иногда и отпарку вели вручную на открытом огне [9]. В связи с этим количество техногенной ртути, сброшенной в природную среду в районах золотодобычи в Амурской области, только за период 1969–1974 гг. составило более 16 т [10]. Процесс добычи золота не являлся экологически безопасным, часто из-за кустарного применения металлической ртути для амальгамации тонкого золота в прошлом и настоящем [8, 11–13]. В конце 1988 г. Главное управление драгоценных металлов и алмазов при Кабинете министров СССР запретило применение амальгамации золота. Тем не менее такая практика незаконно продолжается на некоторых артелях Приамурья до настоящего времени.

Северные районы Амурской области относятся к одному из самых богатых минеральными сырьем регионов России. На территории этих районов сконцентрированы значительные месторождения россыпного золота. В географическом отношении к этому региону относятся Зейский и Мазановский районы Амурской области. В Зейском районе зарегистрировано 27 предприятий по добыче россыпного золота. Нами было проведено обследование



нарушенных территорий, сформированных при освоении золотороссыпных месторождений в среднем течении р. Джелтулак-1. Река Джелтулак-1 имеет протяженность 38 км, берет начало у подножья Гарь-Калахтинского водораздела и впадает с правого берега в р. Большой Джелтулак (бассейн р. Селемджи) на 22 км от устья. Она принимает 17 притоков, из них 16 притоков имеют длину менее 10 км каждый и общую протяженность 54 км. На водосборе реки находится 11 озер общей площадью 0,44 км². Джелтулак-1 относится к водотоку высшей категории водных объектов рыбохозяйственного значения. Такая категория устанавливается для водных объектов, которые являются местами обитания, размножения, зимовки, нагула, путями миграций особо ценных и ценных видов водных биологических ресурсов (при наличии одного из показателей).

На сегодняшний день, согласно выданным лицензиям, золотодобычу на р. Джелтулак-1 осуществляют три старательских артели.

На данном этапе цель нашей работы – изучение влияния россыпной золотодобычи на бассейново-речные геосистемы водосбора р. Амур. Объектом исследования служили природные и природно-техногенные геосистемы р. Джелтулак-1.

В административном отношении исследуемая территория расположена в Зейском районе Амурской области. Долины водотоков данного района характеризуются значительной шириной, пологим спокойным продольным профилем и наличием пологих, значительных по ширине увалов (террасоувалов), постепенно переходящих в междуречные пространства и водоразделы. Гидрологический режим водотоков типичен для дальневосточных рек. Замерзают они в конце октября – начале ноября, толщина льда в конце зимы достигает 1–1,5 м. Летом после дождей на реках бывают паводки, при которых уровень

воды поднимается на 1–3 м. Питание рек обеспечивается в основном за счет дождей (50–70 % годового стока), на снеговое питание приходится 10–20 %, на грунтовые воды – 10–30 %. В долинах рек широко развиты травяные с кочковатой поверхностью («кочковатая марь») болота глубиной до 1 м. Замерзание болот начинается в конце октября, а в декабре они промерзают на всю глубину и становятся проходимыми для всех видов транспорта. Оттаивание болот протекает медленно и заканчивается в июле – начале августа. Во время дождей болота заливаются водой и становятся непроходимыми.

Лесная растительность (в основном лиственница и береза) покрывает междуречье и водораздельное пространство, хотя редко образует сплошные массивы.

Климат района континентальный. Зима здесь суровая и продолжительная (с середины октября до середины апреля) с преобладанием тихой ясной погоды. Снега зимой выпадает мало. Устойчивый снежный покров устанавливается в конце октября и к марта составляет 0,2–0,5 м. Минимальная температура достигает -47 °С. Весна короткая (с середины апреля до конца мая), отличается неустойчивой погодой и наиболее сильными ветрами. Снежный покров сходит в конце апреля, в это же время начинается ледоход. Лето теплое с преимущественно облачной погодой. Преобладающая дневная температура воздуха в самый теплый период (июнь – август) – 17–22 °С (табл. 1).

Летом осадки выпадают чаще, чем в другие времена года. Осень (начало сентября – конец октября) в районе исследования короткая, по сравнению с летом имеет меньшую облачность и меньшее количество дней с осадками (табл. 2). Ветра в течение года преобладают северные и северо-западные со средней скоростью 2,3 м/с.

Таблица 1. Средняя месячная температура воздуха района исследования, °С
Table 1. Average monthly air temperature in the district under investigation, °C

Период	Месяц												Год
	I	II	III	IV	V	VI	VII	VIII	IX	X	XI	XII	
Температура воздуха	-26,9	-21,1	-11,2	1	9,2	16,2	18,6	16,2	9,3	1	-16	-25	-2,9

Примечание. Таблица составлена по данным метеостанции Мазаново.

Note. The table is compiled on the basis of the data of Mazanovo meteostation.



Таблица 2. Среднее месячное количество осадков района исследования, мм
Table 2. Average monthly precipitation in the district under investigation, mm

Период	Месяц												Год
	I	II	III	IV	V	VI	VII	VIII	IX	X	XI	XII	
Количество осадков	6,7	4	11,6	38,5	43,3	81,8	134,2	133	74,2	27,5	16,6	8	579,4

Примечание. Таблица составлена по данным метеостанции Мазаново.
Note. The table is compiled on the basis of the data of Mazanovo meteostation.

Зейский район располагается в зоне многолетней мерзлоты, глубина распространения которой составляет 150–180 м. По климатическим условиям данная территория приравнивается к районам Крайнего Севера.

Материалы и методы исследования

Авторами были изучены природные воды р. Джелтулак -1, донные отложения и почвы в районе отбора проб воды. Исследования проведены в 2018 г. в средней части бассейна реки. Общая протяженность маршрута составила более 25 км, в его пределах были отобраны пробы в дражных отстойниках и в русле реки: ПР-1, ПР-3 – отстойники; ПР-2, ПР-4 – р. Джелтулак, 1500 м ниже отстойников; ПР-5 – р. Джелтулак, в районе старой золотодобычи. Отстойники имеют площадь около 50 тыс. м². С целью охраны вод предусмотрен замкнутый цикл оборотного водоснабжения, сокращающий потребление свежей воды и исключающий открытый сброс технологической воды в водоток, с последующей очисткой технологических вод в рабочих и фильтрационном отстойниках. Сток дренажных вод из фильтрационного отстойника будет попадать в р. Джелтулак-1.

Одновременно с отбором водных проб в тех же точках отбирали донные отложения. Отбор проб донных отложений осуществляли методом вычерпывания у берегов с глубины 0,3–0,5 м с заглублением в дно до 10–15 см. Проводили отбор почвы с пробных площадок, расположенных в районе отбора проб воды. Отбор почв производился точечным способом методом конверта из верхнего слоя с глубины 0–20 см. Из пяти точечных проб с одной пробной площадки составляли объединенную

пробу весом примерно 1 кг¹. Отобранные пробы почвы и донных отложений высушивали, просеивали через сито с диаметром 1 мм. Схема отбора проб приведена на рис. 1. Кроме того, были отобраны вода в р. Калахта (точка отбора К-0) и питьевая вода из скважины глубиной 25 м в пос. Октябрьский. На старых отвалах, где ранее происходила добыча золота с использованием метода амальгамации, были отобраны пробы почв Пр-5_{почва}, Пр-6_{почва}.

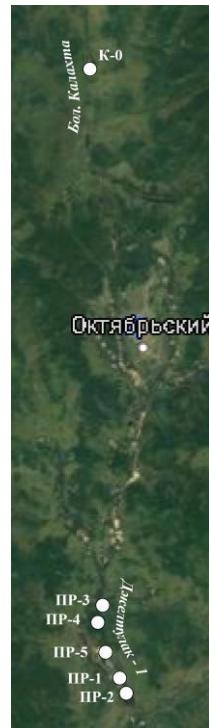


Рис. 1. Схема отбора проб в районе исследования
Fig. 1. Sampling diagram in the area under investigation

Водные пробы фильтровали через бумажный фильтр с размером пор 1000 нм («синяя лента»). Пробы воды ПР-1_{вода}, ПР-3_{вода} фильтровали через три мембранных фильтра с диаметром пор 0,5 мкм.

¹ Гуляева Н. Г. Методические рекомендации по эколого-геохимической оценке территорий при проведении многоцелевого геохимического картирования масштаба 1:1000000 и 1:200000. М.: Изд-во ИМГРЭ, 2002. 70 с.



Для определения микроэлементного состава профильтрованные пробы воды отбирали в пластиковые пробирки, консервировали азотной кислотой, для определения ртути консервировали азотной кислотой и бихроматом калия.

Содержания основных катионов и микроэлементов в пробах воды определяли атомно-эмиссионным (iCAP-6500, Thermo Scientific, США) и масс-спектральным (X-7, Thermo Elemental, США) методами в Аналитическом сертификационном испытательном центре Института проблем технологии микроэлектроники и особочистых материалов Российской академии наук. Анализы химического состава вод – pH, содержания минеральных азотсодержащих веществ, хлоридов, сульфатов, гидрокарбонатов, ортофосфатов – проводили по стандартным методикам в Аналитическом центре минерало-геохимических исследований ИГиП ДВО РАН. Определение содержаний породообразующих элементов и некоторых микроэлементов в донных отложениях выполняли рентгенофлуоресцентным методом в Институте геологии и природопользования Дальневосточного отделения Российской академии наук на рентгеновском спектрометре XRF-1800 (Shimadzu, Япония).

Газорутные измерения припочвенного и придонного воздуха были проведены прибором АГП-01.

Термоформы ртути были определены методом атомной абсорбции (пиролиза) на ртутном анализаторе РА-915+ с приставкой ПИРО-915+ в Международном инновационном научно-образовательном центре «Урановая геология» им. Л. П. Рихванова Инженерной школы природных ресурсов Национального исследовательского Томского политехнического университета. Для определения термоформ ртути была использована программа управления температурой атомизатора, обеспечивающая наиболее эффективное разделение пиков выхода ртути при нагреве образцов, что позволило измерять содержание ртути в образцах при их нагревании в режиме температурно-программированного нагрева [14]. Это давало возможность разделять соединения ртути, связанные с поверхностью связями различной прочности. Режим

регистрации термоформ реализовался с помощью программы «Рапид» и был следующим: температурный диапазон – 25–850 °С, скорость нагрева – 0,8 град./с, продолжительность нагрева – 15 мин. Предел обнаружения метода – 5 нг/г. Для контроля точности определения ртути использовали стандартные образцы состава дерново-подзолистой супесчаной почвы СДПС-3 (ГСО 2500-83).

Результаты исследования и их обсуждение

Известно, что величина pH является важным показателем геохимического состояния вод, от которого зависит устойчивость форм миграции химических элементов и степень неравновесности вод относительно подстилающих пород. Изученные поверхностные воды относятся к слабощелочным (табл. 3).

По химическому составу воды можно отнести к гидрокарбонатным кальциевым, реже – сульфатно-гидрокарбонатным натриево-кальциевым (табл. 4). Согласно классификации О. А. Алёкина, воды на изученной территории пресные или ультрапресные с малой минерализацией.

В речных водах района исследования отмечается нарушение рыбохозяйственных нормативов по содержанию ионов аммония на всех точках отбора (см. табл. 3). Вероятно, это связано с природными факторами, в частности с трансформацией органического вещества в лесных ландшафтах и последующим выносом образующихся продуктов в речную сеть. Нельзя отрицать и влияние антропогенных факторов. Повышенное содержание в водной системе ионов аммония может быть следствием отсутствия очистных сооружений.

Концентрации железа и микроэлементов в речных водах рассматриваемой территории изменяются в широком диапазоне (табл. 5). Подавляющая часть микрокомпонентов содержится в концентрациях, не превышающих предельно допустимые концентрации вредных веществ в водах водных объектов рыбохозяйственного значения ($ПДК_{ep}$), концентрации скандия, галлия, германия, селена, рутения, родия, палладия, осмия, иридия, платины, индия, теллура ниже предела обнаружения. Для железа, марганца, меди, алюминия,

Таблица 3. Средний химический состав вод реки Джелтулак-1, мг/дм³Table 3. Average chemical composition of water of the Dzheltulak-1 river, mg/dm³

Компонент	Точка отбора							$\text{ПДК}_{\text{ср}}^2$
	ПР-1 _{вода}	ПР-2 _{вода}	ПР-3 _{вода}	ПР-4 _{вода}	ПР-5 _{вода}	К-0 (Калахта)	Скважина	
pH	7,59	8,03	7,76	7,56	8,6	8,02	8,2	
NO_2^-	0,53	0,035	0,055	0,049	0,027	0,023	0,028	0,08
NO_3^-	2,4	0,8	0,4	2	0,5	0,5	2,6	40
NH_4^+	1,77	1,14	1,25	0,93	0,83	1,25	0,31	0,5
HCO_3^-	64,66	118,3	43,92	36,6	187,9	76,86	137,9	—
PO_4^{3-}	0,034	0,022	0,017	0,006	0,023	0,027	0,029	0,05
Cl^-	3,26	3,47	2,97	3,54	15,93	3,54	2,83	300
SO_4^{2-}	16,7	<1	15,02	10,2	<1	<1	<1	100
Li	0,001	0,001	0,0006	0,0008	0,0029	0,0011	0,0016	0,08
K	3,56	0,89	2,45	1,53	3,63	0,49	2,53	50
Na	10,3	3,98	5,49	3,75	6,25	3,38	4	120
Ca	24,4	34,6	14,8	24,5	75,9	20,9	37,2	180
Mg	3,69	5,49	2,02	2,89	8,69	3,19	7,89	40

Таблица 4. Характеристика гидрохимического типа речных вод на россыпных месторождениях района исследования

Table 4. Characteristics of the hydrochemical type of river water at placer deposits of the area under investigation

Точка отбора	Формула Курлова	Гидрохимический тип вод
ПР-1 _{вода}	M0,13 $\frac{\text{HCO}_3^- 69[\text{SO}_4^{2-} 23\text{Cl}^- 6]}{\text{Ca} 52\text{Na}26[\text{Mg}13]}$	Гидрокарбонатная натриево-кальциевая, пресная
ПР-2 _{вода}	M0,17 $\frac{\text{HCO}_3^- 94[\text{Cl}^- 5]}{\text{Ca} 70[\text{Mg}18\text{Na}9]}$	Гидрокарбонатная кальциевая, пресная
ПР-3 _{вода}	M0,09 $\frac{\text{HCO}_3^- 64\text{SO}_4^{2-} 28[\text{Cl}^- 7]}{\text{Ca} 54\text{Na}25[\text{Mg}12]}$	Сульфатно-гидрокарбонатная натриево-кальциевая, ультрапресная
ПР-4 _{вода}	M0,09 $\frac{\text{HCO}_3^- 64[\text{SO}_4^{2-} 22\text{Cl}^- 11]}{\text{Ca} 67[\text{Na}14\text{Mg}13]}$	Гидрокарбонатная кальциевая, ультрапресная
ПР-5 _{вода}	M0,3 $\frac{\text{HCO}_3^- 87[\text{Cl}^- 13]}{\text{Ca} 76[\text{Mg}14\text{Na}9]}$	Гидрокарбонатная кальциевая, пресная
Калахта	M0,11 $\frac{\text{HCO}_3^- 91[\text{Cl}^- 7]}{\text{Ca} 66[\text{Mg}17\text{Na}11]}$	Гидрокарбонатная кальциевая, пресная

ванадия, молибдена и ртути отмечено превышение рыбохозяйственных нормативов в значительной части проб поверхностных вод. Для никеля, свинца и цинка превышение нормативов наблюдается только в отстойниках. Наибольшее превышение (в десятки раз) характерно для железа, марганца, меди, алюминия. Наибольшее содержание этих элементов отмечено в водах отстойников (см. табл. 5). В пробах воды из р. Джелтулак-1 ниже отстойников оно значительно меньше, но выше предельно допустимых концентраций вредных веществ в водах водных объектов рыбохозяй-

ственного значения, что свидетельствует о проницаемости дамб и просачивании неосветленных вод в р. Джелтулак-1.

В водных объектах, находящихся в техногенных зонах, концентрации растворенных форм ртути изменились от 0,01 до 1,7 мкг/дм³. Максимальное их содержание отмечено в воде отстойников. В рабочих отстойниках находится вода в виде пульпы с промприборами. В отстойниках происходит складирование хвостов промывки и очистка технологической воды от крупной фракции эфелей.

² Нормативы качества воды водных объектов рыбохозяйственного значения, в том числе нормативы предельно допустимых концентраций вредных веществ в водах водных объектов рыбохозяйственного значения. Приложение к приказу Министерства сельского хозяйства РФ от 13 декабря 2016 г. № 552 // Base.garant.ru [Электронный ресурс]. URL: <https://base.garant.ru/71586774/53f89421bbdaf741eb2d1ecc4ddb4c33/> (13.08.2021).



**Таблица 5. Среднее содержание микроэлементов в поверхностных водах
 Джелтулакского золотороссыпного месторождения, мкг/дм³**
**Table 5. Average content of trace elements in the surface water
 of the Dzheltulak gold placer deposit, µg/dm³**

Элемент	Точка отбора							$\text{ПДК}_{\text{в}}^3$	$\text{ПДК}_{\text{ср}}$
	ПР-1 вода	ПР-2 вода	ПР-3 вода	ПР-4 вода	ПР-5 вода	Калахта (вода)	Питьевая вода		
Ti	6,6	1,7	8,3	12,3	1,7	2,1	1,1	100	60
Al	798	44,4	642	1214	294	74,3	552,1	200	40
Fe	3151	790	1478	1234	144	843	11,1	300	100
Mn	187	11,4	40,1	578	32,9	6,1	25,6	100	10
Li	2,13	1,56	1,88	2,24	2,61	1,66	2,81	30	80
Be	0,082	0,013	0,052	0,059	0,013	0,015	<0,007	0,2	0,3
V	2,2	0,47	2	1,6	0,9	0,5	2,1	100	1
Cr	12,8	2,5	5,9	25,1	<7	<7	<7	50	70 (Cr^{+3})
Co	1,12	< 0,07	0,62	0,85	0,16	<0,07	<0,07	100	10
Ni	11,4	1,8	12,4	4,1	2	2,2	<0,2	20	10
Cu	93,7	1,3	33,4	2,8	2,8	2,3	4,4	1000	1
Zn	131	1,2	49,7	7,7	2,6	4,5	2,8	5000	10
As	2,1	2,4	1,2	2,4	5,1	0,75	4,4	10	50
Rb	1,33	0,52	1,18	1,36	1,15	0,44	3,01	100	100
Sr	109	152	49,9	113	317	89,7	154	7000	400
Y	0,76	0,11	0,48	0,36	0,085	0,21	0,040	—	—
Zr	0,7	0,26	0,67	0,72	0,18	0,26	0,1	—	70
Nb	0,027	0,0043	0,026	0,043	0,012	0,0078	0,016	10	—
Mo	1,7	1,31	3	0,43	1,28	1,33	4,11	70	1
Ag	0,035	<0,006	1,34	0,01	<0,006	0,01	<0,006	50	—
Cd	0,046	0,0072	0,19	0,016	0,022	<0,006	0,079	1	5
Sn	13,71	0,073	4,98	2,67	1,42	0,52	0,64	2000	112
Sb	0,44	0,2	0,42	0,28	0,58	0,097	0,77	5	—
Cs	0,029	0,0052	0,046	0,075	0,0092	0,009	0,082	—	1000
Ba	123	83,5	66,4	144	140	57,1	59	700	740
Hf	0,258	0,0077	0,028	0,036	0,0052	0,009	<0,004	—	—
W	0,14	0,0088	0,21	0,028	0,03	0,0077	1,04	50	0,8
Tl	0,0069	0,0012	0,0097	0,0074	0,0029	0,014	0,0038	0,1	—
Pb	7,1	0,48	4,2	1,3	0,55	1,5	0,29	100	6
Bi	0,04	0,0093	0,055	0,14	0,038	0,024	0,0046	100	—
Th	0,43	0,022	0,26	0,16	0,02	0,028	0,024	—	—
U	0,32	0,63	0,3	0,19	2,52	0,095	0,36	15	—
Hg	1,7	0,027	2,2	0,01	0,027	0,026	0,024	0,5	0,01

Примечание. Прочерк – нет нормативов.

Note. Line stands for no standards.

В течение длительного времени и вплоть до 1988 г. в России процесс золотодобычи сопровождался применением металлической ртути для извлечения тонкого золота. Мелкие старательские артели чаще всего удаляли ртуть из амальгамированного золота кустарным способом. История золотодобычи в Приамурье насчитывает более 160 лет. Так как в прошлом веке на исследуемой территории старатели добывали золото, было сделано

предположение, что донные отложения старых техногенных водоемов загрязнены ртутью, поэтому за счет ее миграции в водную фазу концентрация растворенной формы ртути повышена. Кроме того, в результате развития гетеротрофных микроорганизмов в придонных слоях воды водоемов-отстойников возрастает вероятность микробиального метилирования ртути и накопления ее в трофических цепях водных экосистем [9].

³ СанПиН 1.2.3685-21. Гигиенические нормативы и требования к обеспечению безопасности и (или) безвредности для человека факторов среды обитания // Docs.cntd.ru [Электронный ресурс]. URL: <https://docs.cntd.ru/document/573500115#656010> (13.08.2021).



Основными источниками элементов при формировании химического состава водных систем являются породы [15], и, вероятно, различия в водовмещающих породах, слагающих лitoоснову, отражаются на химическом составе природных вод. На границе двух фаз – твердой и жидкой – начинаются процессы перехода химических элементов в раствор и их миграция.

Одной из проблем золотодобычи на россыпных месторождениях является рост в речной воде из-за работы драги взвешенных частиц, размер которых составляет более 0,5 мкм. Рост уровня замутненности приводит к увеличению наносов в водоеме, затрудняет проникновение света в толщу воды, вызывает деформацию русла. В замутненной воде угнетается рост водорослей и макрофитов из-за уменьшения фотосинтеза и физического давления растительности на дне водоема. Снижается количество и разнообразие бентосных беспозвоночных в результате уменьшения растительности, засорения пищевого аппарата мелкими взвешенными частицами и отсутствия подходящих условий для обитания в наддонном слое. В составе сообщества будут преобладать те виды, которые более приспособлены к обитанию в сильно замутненных водах. Рыба страдает в результате уменьшения количества пищи. Из-за повышения содержания мягкого грунта в слоях придонного гравия, служащего местом нереста, уменьшается скорость водного потока внутри слоя гравия, а вследствие этого и способность пластовой воды переносить кислород, что влияет на выживаемость икры и мальков.

Таким образом, присутствие взвеси в водоемах в периоды, когда не происходит естественного размыва наносов, сопровождается отложением на дне мелкофракционного грунта, что приводит к отрицательным последствиям. При этом наибольшую опасность для водоемов представляют не одноразовые, а постоянные вредные воздействия, которые снижают способность организма к выживанию. Согласно данным, приведенным в источнике [16], безопасным является уровень содержания взвешенных твердых частиц не выше 25 мг/л, уровень же 100–400 мг/л губителен для выживания популяции рыбы в количестве, имеющем промышленное значение.

Было установлено, что в рабочих отстойниках осаждаются только частицы крупнее 100 мкм. Основная масса взвешенных частиц представляет собой сцепленные из мелких частиц конгломераты (рис. 2). Размер частиц варьирует от 0,64 до 70 мкм. Просачиваясь через тело фильтрационной дамбы, взвешенные частицы попадают в водоток. Это не соответствует санитарным нормам водных объектов высшей категории рыбохозяйственного значения и не позволяет без использования дополнительной очистки при сбросе сточных вод достичь природного фонового содержания взвешенных веществ 20 мг/дм³ для данной реки.

По сравнению с составом верхней континентальной коры [17] средний состав почв и донных отложений (табл. 6) характеризуется относительным дефицитом почти всех породообразующих оксидов и многих элементов. Исключение составляют оксиды кремния и титана, содержание которых приближено к содержанию их в верхней континентальной коре.

Наблюдаются существенно высокие содержания мышьяка, хрома, ртути. Коэффициенты концентраций, рассчитанные как отношение среднего содержания элемента в почве и донных отложениях к условному klarку элемента в верхней континентальной коре (по С. Тейлору и С. Маклennану), составляют в среднем: для хрома – 2,4; для мышьяка – 9,7 и 11,6 соответственно; для ртути – 5,1 и 2,1 соответственно. Валовое содержание мышьяка в пробах донных отложений и почв выше санитарно-гигиенических нормативов. Превышение предельно допустимых концентраций по мышьяку составило 2,7–14,5 раза. Повышенная концентрация мышьяка свидетельствует, скорее всего, о природных металлогенических особенностях территории Амурской области [18, 19].

Как уже отмечалось выше, одной из проблем россыпной золотодобычи является ртутное загрязнение от золотодобычи прошлых лет. Для корректной оценки степени ртутного загрязнения за счет использования ртутной амальгамации необходимо сопоставить содержание ртути фоновой и техногенной территории, на которых непосредственно использовалась ртуть. При обследовании территории р. Джелтулак-1 были изучены старые

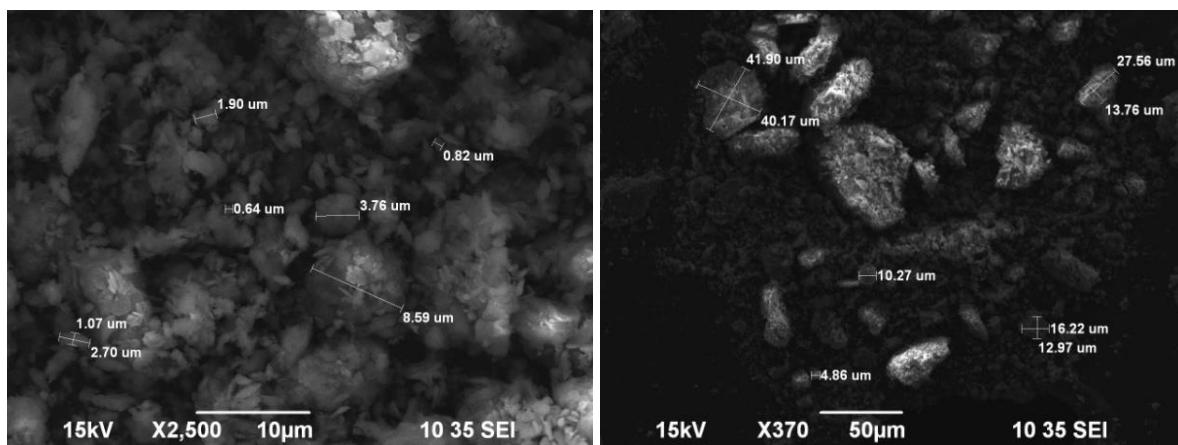


Рис. 2. Электронные снимки взвешенных частиц в отстойниках реки Джелтулак-1
 Fig. 2. Electronic images of suspended particles in Dzheltulak-1 settlement ponds

Таблица 6. Химический состав донных отложений, почв, % / мг/кг, и содержание ртути* в надпочвенном воздухе, мкг/м³

Table 6. Chemical composition of bottom sediments, soils, % / mg/kg, and mercury content* in above the soil surface air, μg/m³

Компонент	Почва						Донные отложения					Верхняя континентальная кора [17]	$\text{ПДК}_{\text{почв}}^4$
	ПР-1	ПР-2	ПР-3	ПР-4	ПР-5	ПР-6	ПР-1	ПР-2	ПР-3	ПР-4	ПР-5		
SiO_2	68,6	71	74,4	59,3	57,8	66,4	67,3	72,6	73	72,3	70,6	66	—
Al_2O_3	14,6	12,9	12,5	15,2	13,9	14,1	15,6	13,2	11,8	13,3	13,8	15,2	—
TiO_2	0,49	0,46	0,37	0,69	0,61	0,62	0,67	0,39	0,53	0,27	0,53	0,5	—
CaO	0,58	0,81	0,83	2,76	1,39	1,27	0,99	0,63	0,84	0,85	1	4,2	—
MnO	0,07	0,05	0,04	0,06	0,06	0,08	0,04	0,04	0,05	0,08	0,05	0,077	0,19
Fe_2O_3	2,73	2,64	2,2	4,57	4,35	3,95	2,76	2,29	2,27	1,93	3	4,5	—
MgO	0,5	0,59	0,53	1,89	0,84	0,86	0,54	0,31	0,45	0,6	0,59	2,2	—
K_2O	3,26	3,07	2,89	2,15	2,43	2,77	2,98	3,52	2,82	3,66	2,92	3,4	—
Na_2O	2,05	1,84	2,68	2,73	1,33	1,48	2,74	3,01	2,55	2,53	1,75	3,9	—
P_2O_5	0,08	0,1	0,07	0,11	0,16	0,1	0,09	0,07	0,07	0,06	0,08	0,2	—
V	63,6	61,6	35,4	97,3	96,9	82,9	62,8	31,9	45,6	25,9	62,1	60	150
Cr	53,8	54,9	47,5	70,4	186	74,1	75,3	117	127	43,2	63,1	35	—
Co	12,5	8,2	12	18,4	14,7	10,1	10,9	7,5	6,3	7,1	11,1	10	—
Ni	29,2	21,4	26,1	30,8	32,2	30,5	21,4	24,9	23,4	19,2	27	20	—
Cu	20,5	27,7	17,1	16,5	28,1	26,6	15,5	19,9	12,2	13,8	21,7	25	132
Zn	48,1	73,3	37,2	77	85	91,5	62,3	32,7	38	35,6	57,1	71	—
Rb	123	123	108	67,3	117	117	95,6	114	104	117	118	112	—
Sr	182	188	224	367	231	218	247	206	216	220	2178	350	—
Y	17,5	16,5	14,3	22,1	38,7	21	20,5	29	17,7	15,2	20,9	22	—
Nb	12,5	11,3	9	8,1	13,1	12,3	16,2	9,5	10,4	7,0	10,9	25	—
Zr	203	223	147	189	229	188	396	166	218	130	195	190	—
Ba	1016	836	739	1248	737	802	1018	1170	745	1273	792	550	—
As	9,6	5,4	16,8	17,2	28,4	12,7	15,3	5,7	26,1	11,3	28,9	1,5	2
Pb	15,8	23,0	9	19,3	16,2	18,3	15,6	18,3	15,4	13,7	18,9	20	32
Hg	0,04	0,34	0,09	0,03	0,8	1	0,02	0,14	0,09	0,03	0,4	0,065	2,1
Hg^*	0,06	0,04	0,04	0,02	0,03	0,09	0,03	0,02	0,03	0,02	0,04	—	—

Примечание. Концентрации оксидов от SiO_2 до P_2O_5 приведены в процентах, микроэлементов – в мг/кг. Прочерк – нет значений.

Note. Oxide concentrations from SiO_2 to P_2O_5 are given in per cents %, trace elements – in mg/kg. Line indicates no values.

⁴ГН 2.1.7.2041-06. Предельно допустимые концентрации (ПДК) химических веществ в почве // Docs.cntd.ru [Электронный ресурс]. URL: <https://docs.cntd.ru/document/901966754?marker=6500IL> (13.08.2021).



отвалы, созданные артелью, которая активно использовала амальгамацию россыпного золота. Часть отвалов в настоящее время рекультивирована. В табл. 6 также приведены данные по измерению ртути в надпочвенном воздухе проб почв и донных отложений (показатель Hg^*). По данным измерения концентрации паров ртути над поверхностью образцов почвогрунтов было зафиксировано значительное превышение по сравнению с предельно допустимыми концентрациями для атмосферного воздуха – в среднем на два порядка ($ПДК_{возд} = 0,0003 \text{ мг}/\text{м}^3$). При замерах надпочвенного воздуха с помощью АГП-01 для повышения точности и чувствительности определения в каждой точке сделано по пять измерений на разных диапазонах объемов анализируемого воздуха. Максимальные концентрации были зафиксированы в надпочвенном воздухе старого отвала (проба ПР-6 почва), что объясняется, вероятнее всего, более сильным загрязнением почв в результате использования ртути в обогатительном процессе.

Сведения о фоновых концентрациях ртути в почвах различных регионов мира различны, и диапазон их колебаний очень большой. Согласно источнику [20], фоновые уровни ртути в почве можно оценить приблизительно в 0,1 мг/кг. Содержание ртути, превышающее эту величину, следует, по-видимому, рассматривать как загрязнение из антропогенных или других источников. Кларк ртути в почвах составляет 0,02 мг/кг. Почвы прочно связывают ртуть за счет комплексообразования с функциональными группами гумусовых веществ, период ее полувыведения оценивается в 250 лет [21]. Вследствие этого ртутное загрязнение почв носит долговременный характер. Как показали результаты исследований, ртутное загрязнение почв (0,8–1 мк/кг) характерно только для тех объектов, на которых ранее использовалась ртуть (точки ПР-5 почва, ПР-6 почва). Содержание ртути в изученных донных отложениях варьировало от 0,015 до 0,4 мг/кг. Донные отложения водотоков и водоемов – одни из самых уязвимых компонентов окружающей среды по отношению к загрязнению токсичными металлами.

Накопление ртути происходит за счет седиментации взвешенного материала, а также

в результате сорбции из воды. Фоновое содержание ртути в верхних слоях донных отложений колеблется в интервале 0,01–0,3 мг/кг сухой массы [9]. Повышенные концентрации ртути в донных отложениях (0,4 мг/кг) установлены вблизи старого карьера (ПР-5 донные), при разработке которого применялась ртуть, и они примерно в 3–30 раз превышают уровень в других точках отбора. Таким образом, добыча золота с применением ртути приводит к возрастанию ее концентрации в донных отложениях водоемов примерно на порядок.

В последнее время при проведении геоэкологических исследований получил распространение термодесорбционный анализ твердофазных природных сред, позволяющий одновременно определять все формы ртути. По его результатам можно разделить природные и техногенные формы ртути. Определение форм ртути в почвах и осадках дает необходимую информацию для оценки потенциального риска, позволяет судить о характере трансформации исходных носителей ртути и особенностях миграции ее соединений, что важно для разработки методов ремедиации загрязненных природных сред [22].

Для диагностики используются следующие температурные параметры: температура максимального выхода T_m , температура окончания выхода данной термоформы T_{ov} и разность между ними $T_{ov} - T_m$ – дополнительный параметр, характеризующий ширину температурного интервала выхода данной формы ртути. Характеристики этих диагностических параметров приведены в табл. 7 [23].

В рамках проведенного исследования на небольшом фактическом материале (шесть проб почв и донных отложений) впервые получены данные об относительной доле твердофазных форм ртути на изученных участках ее природной и техногенной эмиссии (рис. 3).

Для пробы ПР-5 почва доля физически сорбированной ртути достигает 97,7 %, доля хемосорбированной ртути – 2,3 %. Доля свободной формы ртути в пробе ПР-6 почва составляет 97,5 %, доля физически сорбированной ртути – 2,5 %. Такое распределение ртути по формам в пробе ПР-6 почва может свидетельствовать о недавнем незаконном применении процесса амальгамации.



Таблица 7. Температурные параметры форм ртути, °С
 Table 7. Temperature parameters of mercury forms, °C

Форма ртути	T_M	$T_{об}$	$T_{об} - T_M$
Свободная (в виде микрокапель жидкой ртути)	150–160	160–180	10–20
Физически сорбированная	250–290	290–360	40–90
Хемосорбированная	310–320	380–400	70–80
Сульфидная	350–410	390–480	40–70
Изоморфная	500–1000	580–1100	80–100

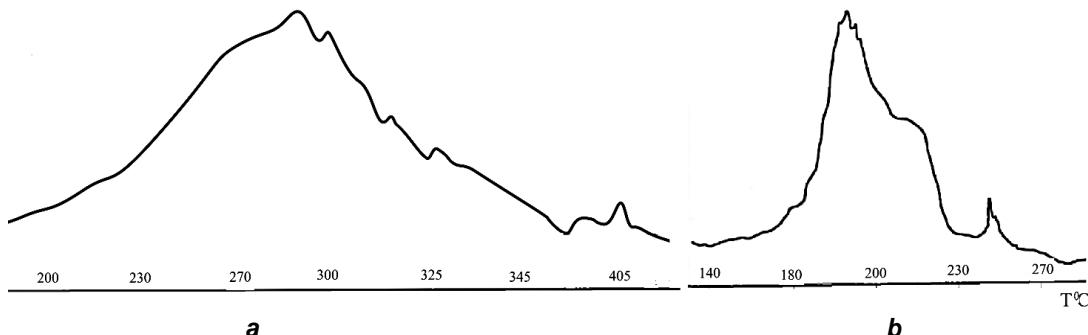


Рис. 3. Термоформы ртути:
 а – проба ПР-5_{почва}; б – проба ПР-6_{почва}
 Fig. 3. Mercury thermoforms:
 a – sample PR-5_{soil}; b – sample PR-6_{soil}

Таким образом, воздействие россыпной золотодобычи на окружающую среду многофакторно. Наибольшая опасность данного типа природопользования состоит в широком распространении по речной сети различных воздействий, в том числе высокотоксичного ртутного загрязнения. Поэтому первоочередными задачами эколого-геохимических исследований на севере Амурской области является выявление локальных участков опасного ртутного загрязнения с целью их очистки, а также проведение профилактических мер.

Заключение

Одним из наиболее существенных факторов, обусловливающих ухудшение экологической ситуации на территориях россыпной золотодобычи, является загрязнение природных водотоков. Основной причиной техногенного загрязнения р. Джелтулак-1 становится фильтрационная утечка вод из отстойников. В ходе проведенного исследования нами

отмечено превышение предельно допустимых концентраций вредных веществ в водах водных объектов рыбохозяйственного значения по содержанию ионов железа, марганца, меди, алюминия, ртути и взвешенных веществ в р. Джелтулак-1 за пределами золоторазработки. Подобное изменение природного гидрохимического состава воды отрицательно сказывается на рыбных запасах.

В результате исследования также установлены уровни содержания ртути в природных средах в районе россыпной золотодобычи – в среднем течении р. Джелтулак-1. Методом атомной абсорбции на ртутном анализаторе выполнено разделение ртутного загрязнения почв по формам нахождения ртути на свободную, физически сорбированную и хемосорбированную формы. Обнаружен факт недавнего использования запрещенных технологических схем обогащения золотосодержащих песков методом амальгамации.

Список источников

1. Эйриш Л. В. Некоторые геолого-геоморфологические особенности формирования золотоносных россыпей Приамурья // Тихоокеанская геология. 2008. Т. 27. № 5. С. 104–114.
2. Бубнова М. Б. Способ интегральной оценки уровня загрязнения природной среды при эксплуатации месторождений цветных и редких металлов // Известия высших учебных заведений. Горный журнал. 2006. № 4. С. 86–91.
3. Зелинская Е. В., Горбунова О. И., Щербакова Л. М. Воздействие разработки россыпей на окружающую среду // Горный журнал. 1998. № 5. С. 27–28.



4. Пашкевич М. А. Техногенные массивы и их воздействия на окружающую среду. СПб.: Изд-во СПГГИ, 2000. 229 с.
5. Саксин Б. Г. Прогнозная экологическая оценка регионального воздействия горных работ на окружающую природную среду при добыче цветных и редких металлов на востоке России // Тихоокеанская геология. 2008. Т. 27. № 5. С. 115–123.
6. Трубецкой К. Н., Галченко Ю. П., Бурцев Л. И. Экологические проблемы освоения недр при устойчивом развитии природы и общества. М.: Научтехлитиздат, 2003. 261 с.
7. Ngure V., Davies T, Kinuthia G., Sitati N., Shisia S., Oyoo-Okoth E. Concentration levels of potentially harmful elements from gold mining in Lake Victoria Region, Kenya: environmental and health implications // Journal of Geochemical Exploration. 2014. Vol. 144. P. 511–516. <https://doi.org/10.1016/j.gexplo.2014.04.004>.
8. Коваль А. Т., Павлова Л. М., Радомская В. И., Радомский С. М., Куимова Н. Г., Крылов А. В. Ртуть в экосистемах Приамурья // Вестник Дальневосточного отделения Российской академии наук. 2002. № 4. С. 94–103.
9. Лапердина Т. Г., Тупяков А. В., Егоров А. И., Мельникова М. В., Аскарова О. Б., Банщиков В. А. [и др.]. Ртутное загрязнение окружающей среды в зонах влияния золотодобывающих предприятий Забайкалья // Химия в интересах устойчивого развития. 1995. Т. 3. № 1-2. С. 57–67.
10. Коваль А. Т., Сидоров Ю. Ф., Нагорный В. А., Остапчук В. И. Техногенное загрязнение металлической ртутью районов золотодобычи Амурской области и Хабаровского края // Добыча золота. Проблемы и перспективы: доклады науч.-практ. семинара. Хабаровск, 1997. С. 347–352.
11. Yun S.-W., Kim D.-H., Kang D.-H., Son J., Lee S.-Y., Lee C.-K., et al. Effect of farmland type on the transport and spatial distribution of metal(loid)s in agricultural lands near an abandoned gold mine site: confirmation of previous observations // Journal of Geochemical Exploration. 2017. Vol. 181. P. 129–137. <https://doi.org/10.1016/j.gexplo.2017.07.004>.
12. Arifin Y. I., Sakakibara M., Takakura S., Jahja M., Lihawa F., Sera K. Artisanal and small-scale gold mining activities and mercury exposure in Gorontalo Utara Regency, Indonesia // Toxicological & Environmental Chemistry. 2020. Vol. 102. Iss. 10. P. 521–542. <https://doi.org/10.1080/02772248.2020.1839074>.
13. Mantey J., Nyarko K. B., Owusu-Nimo F., Awua K. A., Bempah C. K., Amankwah R. K., Akatu W. E., et al. Mercury contamination of soil and water media from different illegal artisanal small-scale gold mining operations (galamsey) // Heliyon. 2020. Vol. 6. Iss. 6. P. e04312. <https://doi.org/10.1016/j.heliyon.2020.e04312>.
14. Mashyanov N. R., Pogarev S. E., Panova E. G., Panichev N., Ryzhov V. Determination of mercury thermo-species in coal // Fuel. 2017. Vol. 203. P. 973–980. <https://doi.org/10.1016/j.fuel.2017.03.085>.
15. Табаксблат Л. С., Бизяев Н. А. Гидрогоеохимическая трансформация Липовского месторождения силикатного никеля (Средний Урал) в условиях регрессивной стадии его техногенеза // Литосфера. 2008. № 6. С. 73–81.
16. Пахомов В. П. Охрана окружающей среды при разработке золотороссыпных месторождений // Колыма. 1986. № 10. С. 30–32.
17. Тейлор С. Р., Мак-Леннан С. М. Континентальная кора: ее состав и эволюция / пер. с англ. Р. Н. Соболева, Л. Т. Соболевой. М.: Мир, 1988. 384 с.
18. Павлова Л. М., Радомская В. И., Юсупов Д. В. Высокотоксичные элементы в почвенном покрове на территории г. Благовещенска // Экология и промышленность России. 2015. Т. 19. № 5. С. 50–55.
19. Павлова Л. М., Радомская В. И., Юсупов Д. В. Высокотоксичные элементы в снежном покрове на территории г. Благовещенска // Геоэкология. Инженерная геология, гидрогоеология, геокриология. 2015. № 1. С. 27–35.
20. Кабата-Пендиас А., Пендиас Х. Микроэлементы в почвах и растениях / пер. с англ. Д. В. Гричук, Е. П. Янин. М.: Мир, 1989. 439 с.
21. Израэль Ю. А. Экология и контроль состояния природной среды. М.: Гидрометеоиздат, 1984. 560 с.
22. Робертус Ю. В., Рихванов Л. П., Ляпина Е. Е., Любимов Р. В., Юсупов Д. В., Осипова Н. А. Формы нахождения и переноса ртути в компонентах экосистем Горного Алтая // Химия в интересах устойчивого развития. 2018. Т. 26. № 2. С. 185–192. <https://doi.org/10.15372/KhUR20180209>.
23. Таусон В. Л., Гелетий В. Ф., Меньшиков В. И. Уровни содержания, характер распределения и формы нахождения ртути как индикаторы источников ртутного загрязнения природной среды // Химия в интересах устойчивого развития. 1995. Т. 3. № 1-2. С. 151–159.

References

1. Eirish L. V. Some geologic-geomorphological features of formation of gold-bearing placers in Priamurye. *Tikhookeanskaya geologiya*. 2008;27(5):104-114. (In Russ.).
2. Bubnova M. B. Method of integral assessment of the level of environmental pollution under development of non-ferrous and rare metals deposits. *Izvestiya vysshikh uchebnykh zavedenii. Gornyi zhurnal* = News of the Higher Institutions. Mining Journal. 2006;4:86-91. (In Russ.).
3. Zelinskaya E. V., Gorbunova O. I., Shcherbakova L. M. Environmental impact of placer mining. *Gornyi zhurnal*. 1998;5:27-28. (In Russ.).
4. Pashkevich M. A. *Technogenic masses and their environmental impact*. Saint Petersburg: Saint Petersburg Mining University; 2000. 229 p. (In Russ.).
5. Saksin B. G. Forecast ecological evaluation of the regional effect of rare and non-ferrous metal mining on the environment in eastern Russia. *Tikhookeanskaya geologiya*. 2008;27(5):115-123. (In Russ.).
6. Trubetskoi K. N., Galchenko Yu. P., Burtsev L. I. *Environmental problems of subsoil development in sustainable development of nature and society*. Moscow: Nauchtekhlitizdat; 2003. 261 p. (In Russ.).



7. Ngure V., Davies T, Kinuthia G., Sitati N., Shisia S., Oyoo-Okoth E. Concentration levels of potentially harmful elements from gold mining in Lake Victoria Region, Kenya: environmental and health implications. *Journal of Geochemical Exploration*. 2014;144:511-516. <https://doi.org/10.1016/j.gexplo.2014.04.004>.
8. Koval' A. T., Pavlova L. M., Radomskaya V. I., Radomskii S. M., Kuimova N. G., Krylov A. V. Mercury in ecosystems of the Amur Region. *Vestnik Dal'nevostochnogo otdeleniya Rossiiskoi akademii nauk = Vestnik of the Far East Branch of the Russian Academy of Sciences*. 2002;4:94-103. (In Russ.).
9. Laperdina T. G., Tupyakov A. V., Egorov A. I., Mel'nikova M. V., Askarova O. B., Banshchikov V. A., et al. Mercury pollution of environment in the zones affected by gold mining enterprises of Transbaikalia. *Khimiya v interesakh ustoichivogo razvitiya*. 1995;3(1-2):57-67. (In Russ.).
10. Koval' A. T., Sidorov Yu. F., Nagornyi V. A., Ostapchuk V. I. Technogenic pollution by metallic mercury in gold mining areas of the Amur region and Khabarovsk krai. In: *Dobycha zolota. Problemy i perspektivy: doklady nauchno-prakticheskogo seminara = Gold mining. Problems and prospects: reports of the scientific and practical seminar*. Khabarovsk; 1997. p.347-352. (In Russ.).
11. Yun S.-W., Kim D.-H., Kang D.-H., Son J., Lee S.-Y., Lee C.-K., et al. Effect of farmland type on the transport and spatial distribution of metal(loid)s in agricultural lands near an abandoned gold mine site: confirmation of previous observations. *Journal of Geochemical Exploration*. 2017; 181:129-137. <https://doi.org/10.1016/j.gexplo.2017.07.004>.
12. Arifin Y. I., Sakakibara M., Takakura S., Jahja M., Lihawa F., Sera K. Artisanal and small-scale gold mining activities and mercury exposure in Gorontalo Utara Regency, Indonesia. *Toxicological & Environmental Chemistry*. 2020;102(10):521-542. <https://doi.org/10.1080/02772248.2020.1839074>.
13. Mantey J., Nyarko K. B., Owusu-Nimo F., Awua K. A., Bempah C. K., Amankwah R. K., Akatu W. E., et al. Mercury contamination of soil and water media from different illegal artisanal small-scale gold mining operations (galamsey). *Heliyon*. 2020;6(6):e04312. <https://doi.org/10.1016/j.heliyon.2020.e04312>.
14. Mashyanov N. R., Pogarev S. E., Panova E. G., Panichev N., Ryzhov V. Determination of mercury thermo-species in coal. *Fuel*. 2017;203:973-980. <https://doi.org/10.1016/j.fuel.2017.03.085>.
15. Tabaksblat L. S., Bizyaev N. A. Hydrogeochemical transformation of Lipovsky silicate nickel deposit (Middle Urals) in conditions of its regressive stage technogenesis. *Litosfera = Lithosphere (Russia)*. 2008;6:73-81. (In Russ.).
16. Pakhomov V. P. Environmental protection under development of gold-placer deposits. *Kolyma*. 1986;10:30-32. (In Russ.).
17. Taylor S. R., McLennan S. M. The continental crust: its composition and evolution. 1988. 384 p. (Russ. ed.: *Kontinental'naya kora: ee sostav i evolyutsiya*. Moscow: Mir; 1988. 384 p.).
18. Pavlova L. M., Radomskaya V. I., Yusupov D. V. High-toxic elements in soil cover at the territory of Blagoveshchensk. *Ekologiya i promyshlennost' Rossii = Ecology and Industry of Russia*. 2015;19(5):50-55. (In Russ.).
19. Pavlova L. M., Radomskaya V. I., Yusupov D. V. Highly toxic elements in snow cover in the Blagoveshchensk territory. *Geoekologiya. Inzhenernaya geologiya, gidrogeologiya, geokriologiya*. 2015;1:27-35. (In Russ.).
20. Kabata-Pendias A., Pendias H. Trace elements in soils and plants. 1989. 439 p. (Russ. ed.: *Mikroelementy v pochvakh i rasteniyakh*. Moscow: Mir; 1989. 439 p.).
21. Izrael' Yu. A. *Ecology and monitoring of environment condition*. Moscow: Gidrometeoizdat; 1984. 560 p. (In Russ.).
22. Robertus Yu. V., Rikhvanov I. P., Lyapina E. E., Lyubimov R. V., Yusupov D. V., Osipova N. A. Forms of Occurrence and Transfer of Mercury in Components of Ecosystems of Gorny Altai. *Khimiya v interesakh ustoichivogo razvitiya*. 2018;26(2):185-192. <https://doi.org/10.1537/KhUR20180209>. (In Russ.).
23. Tauson V. L., Geletii V. F., Men'shikov V. I. Content levels, distribution nature and forms of mercury as indicators of mercury pollution sources of environment. *Khimiya v interesakh ustoichivogo razvitiya*. 1995;3(1-2): 151-159. (In Russ.).

Информация об авторах / Information about the authors



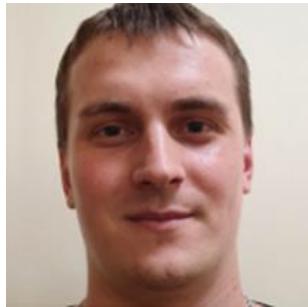
Радомская Валентина Ивановна,
кандидат химических наук,
ведущий научный сотрудник Лаборатории биогеохимии,
Институт геологии и природопользования ДВО РАН,
г. Благовещенск, Россия,
radomskaya@ascnet.ru,
<https://orcid.org/0000-0002-3023-7565>.

Valentina I. Radomskaya,
Cand. Sci. (Chem.),
Leading Researcher of the Laboratory of Biogeochemistry,
Institute of Geology and Nature Management,
Far Eastern Branch of the Russian Academy of Sciences,
Blagoveshchensk, Russia,
radomskaya@ascnet.ru,
<https://orcid.org/0000-0002-3023-7565>.



Радомский Сергей Михайлович,
кандидат геолого-минералогических наук,
научный сотрудник Лаборатории рудогенеза,
Институт геологии и природопользования ДВО РАН,
г. Благовещенск, Россия,
rsm@ascnet.ru,
<https://orcid.org/0000-0002-8522-5510>.

Sergey M. Radomskiy,
Cand. Sci. (Geol. & Mineral.),
Researcher of the Ore Genesis Laboratory,
Institute of Geology and Nature Management,
Far Eastern Branch of the Russian Academy of Sciences,
Blagoveshchensk, Russia,
rsm@ascnet.ru,
<https://orcid.org/0000-0002-8522-5510>.



Сегренев Александр Сергеевич,
младший научный сотрудник,
руководитель Лаборатории элементного и химического анализа
Институт геологии и природопользования ДВО РАН,
г. Благовещенск, Россия,
a-chemist@mail.ru.

Alexander S. Segrenev,
Junior Researcher,
Head of the Laboratory for Elemental and Chemical Analysis,
Institute of Geology and Nature Management,
Far Eastern Branch of the Russian Academy of Sciences,
Blagoveshchensk, Russia,
a-chemist@mail.ru.



Кулик Софья Яновна,
студентка,
Российский государственный педагогический университет им. А. И. Герцена,
г. Санкт-Петербург, Россия,
Sofyanka20011@mail.ru.

Sofya Ya. Kulik,
Student,
Herzen University,
Saint Petersburg, Russia,
Sofyanka20011@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 19.07.2021; одобрена после рецензирования 20.10.2021; принятa к публикации 26.11.2021.

The article was submitted 19.07.2021; approved after reviewing 20.10.2021; accepted for publication 26.11.2021.



Научная статья

УДК 504:553.98

<https://doi.org/10.21285/2686-9993-2021-44-4-485-495>



Проблемы и вопросы охраны природной среды при освоении углеводородных ресурсов в Мировом океане

Владимир Нишанович Экзарьян^a, Артур Константинович Ахмадиев^b

^{a,b}Российский государственный геологоразведочный университет им. Серго Орджоникидзе, г. Москва, Россия
Автор, ответственный за переписку: Ахмадиев Артур Константинович, art696@mail.ru

Резюме. Нефтегазовая отрасль развивается уже на протяжении 150 лет. Несмотря на существующие прогнозы того, что роль углеводородов во второй половине XXI века может снизиться, в настоящий момент они играют ведущую роль в мировой энергетике. В связи с этим возникает интерес к изучению существующих тенденций развития отрасли. В данной работе авторы дают обзор и проводят анализ данных за 2011–2021 гг., связанных с развитием освоения углеводородных ресурсов в морской среде. Для авторов также было важно рассмотреть, как выделенные ими тенденции отражаются или отразятся на состоянии экосистем. Проведенное исследование показало, что в настоящее время выделяются три основных направления развития добычи углеводородов в Мировом океане: освоение морской Арктики, континентального шельфа и возможность организации промышленной добычи в глубоководных районах Мирового океана. Для каждого из направлений были определены как существующие, так и возможные экологические и техногенные риски. Среди них – потеря морского биоразнообразия, активизация опасных геологических процессов, непредсказуемость океанической среды, техногенные аварии и катастрофы, сбросы буровых и других производственных отходов и т. п. В работе также указаны проблемы, которые предстоит решить нефтегазовой отрасли. К ним можно отнести поиск новых технологий для добычи в глубоководных районах, малоизученность просторов Мирового океана, необходимость новых подходов в управлении экологическими рисками, а также создание правовых основ для регулирования недропользования в новых условиях и районах.

Ключевые слова: углеводороды, добыча нефти, загрязнение морской среды, арктическая экосистема, Мировой океан, Арктика, природный газ, природоохранная деятельность

Финансирование: работа выполнена в рамках государственного задания Министерства науки и высшего образования Российской Федерации № 075-00069-20-02 от 10 сентября 2020 г. (тема № AAAA-A20-120092590017-4).

Для цитирования: Экзарьян В. Н., Ахмадиев А. К. Проблемы и вопросы охраны природной среды при освоении углеводородных ресурсов в Мировом океане // Науки о Земле и недропользование. 2021. Т. 44. № 4. С. 485–495.
<https://doi.org/10.21285/2686-9993-2021-44-4-485-495>.

Original article

Challenges and environmental issues in developing hydrocarbon resources in the World ocean

Vladimir N. Ekzaryan^a, Arthur K. Akhmadiev^b

^{a,b}Sergo Ordzhonikidze Russian State University for Geological Prospecting, Moscow, Russia

Corresponding author: Arthur K. Akhmadiev, art696@mail.ru

Abstract. The oil and gas industry has been evolving for 150 years. Despite the predictions on the diminishing role of hydrocarbons in the second half of the 21st century, today they play a leading role in the global energy sector. In view of this there is some interest to study current development trends of the industry. This paper reviews and analyses data for the period from 2011 to 2021, which relate to the development of hydrocarbon resources in the marine and ocean environment. It was important for the authors to consider how the trends they highlighted are affecting or will affect ecosystems. The conducted research has showed that today there are three main development trends in hydrocarbon mining in the World ocean: development of the marine Arctic, continental shelf and the possibility to organize commercial production in the deep sea areas of the World ocean. For each of the directions both existing and potential ecological risks have been identified. They include loss of marine biodiversity, activation of dangerous geological processes, unpredictability of ocean environment, man-made accidents and disasters, discharges of drilling and other industrial waste, etc. The work has also identified the challenges facing the oil and gas industry. These include the search for new technologies for deep-sea production, poorly understood depth of the World ocean, need for new approaches in environmental risk management, as well as the creation of a legal framework for subsoil use regulation in new environments and areas.



Keywords: hydrocarbons, oil production, marine pollution, Arctic ecosystem, World ocean, Arctic, natural gas, environmental activities

Funding: the research was performed within the framework of the state assignment of the Ministry of Science and Higher Education of the Russian Federation no. 075-00069-20-02 of September 10th, 2020 (theme no. AAAA-A20-120092590017-4).

For citation: Ekzaryan V. N., Akhmadiev A. K. Challenges and environmental issues in developing hydrocarbon resources in the World ocean. *Nauki o Zemle i nedropol'zovanie = Earth sciences and subsoil use*. 2021;44(4):485-495. (In Russ.). <https://doi.org/10.21285/2686-9993-2021-44-4-485-495>.

Введение

На протяжении последнего столетия углеводородные ресурсы являются основой энергопотребления и экономики многих стран мира. Тем не менее современные представления, связанные с развитием «зеленой» энергетики, стремлением к достижению углеводородной нейтральности (данная идея, по мнению авторов, спорна) по причине изменения климата, строятся на тезисе о снижении роли углеводородов в мировом энергопотреблении во второй половине XXI века. В одном из недавно опубликованных докладов Международного энергетического агентства (англ.: International Energy Agency, IEA) Net zero by 2050¹, а также докладе Объединенного исследовательского центра Европейской комиссии (англ.: Joint Research Centre, JRC) Global energy and climate outlook 2020: a new normal beyond Covid-19² отмечается, что доля нефти и газа в энергопотреблении может снизиться до 45–20 %. В данных же докладах, а также в работах ряда специалистов (например, А. М. Мастепанова [1]) делается акцент и на том факте, что пандемия COVID-19 уже внесла корректировки в энергетическую политику.

Между тем, следует заметить, что подобные прогнозы неоднозначны ввиду того, что энергетический рынок динамичен. Они также предполагают различные сценарии развития, что отражается на существенном расхождении в определении доли углеводородов в энергопотреблении. Часть идей можно отнести к чисто конъюнктурным. Даже допустимое значительное снижение роли углеводородов еще не говорит о полном отказе от них. Следует полагать, что мир вряд ли будет готов уйти от данного вида топлива.

Принимая во внимание данное утверждение и исходя из этого, что в настоящий момент вклад углеводородов в энергетику многих стран значителен, особое внимание следует уделить изучению направлений развития добычи углеводородов, в частности морской добычи. А исходя из того, что наша планета подвергается все большему давлению из-за деятельности человека по эксплуатации природных ресурсов, важно отметить, как разработка месторождений нефти и газа влияет или может влиять на состояние природной среды в морских условиях.

Материалы и методы исследования

В основе проведенного исследования лежит обзор и анализ публикаций, а также данных Международного энергетического агентства и нормативно-правовых актов Российской Федерации по теме исследования. В отношении публикаций с целью отражения наиболее актуальной информации был взят десятилетний временной промежуток с 2011 по 2021 г. В ходе работы рассматривались исследовательские статьи, эмпирические отчеты, монографии.

Вначале был проведен поиск информации в международных исследовательских базах данных, таких как SpringerLink, Taylor & Francis Online, Brill, Oxford Academic Journals (Oxford University Press). Поиск интересующих нас работ российских авторов проводился посредством Научной электронной библиотеки (eLIBRARY.RU), а поиск нормативно-правовой документации – с помощью базы Электронного фонда нормативно-технической и нормативно-правовой информации Консорциума «Кодекс» (Docs.cntd.ru).

¹ Net Zero by 2050 // Iea.org. [Электронный ресурс]. URL: <https://www.iea.org/reports/net-zero-by-2050> (24.08.2021).

² Global energy and climate outlook 2020: a new normal beyond Covid-19 // Publications.jrc.ec.europa.eu. [Электронный ресурс]. URL: <https://publications.jrc.ec.europa.eu/repository/handle/JRC123203> (24.08.2021).



При осуществлении поиска использовались следующие ключевые слова и тематические направления: нефть, океан, углеводороды, добыча нефти, газогидраты, загрязнение морской среды, арктическая экосистема, добыча полезных ископаемых в океане, разграничение морского дна, бурение в океане, науки об океане, науки об окружающей среде. Данные слова и словосочетания должны были появляться в названии работы, ключевых словах или аннотации.

Кроме того, был произведен поиск конкретных и специфических данных, уточняющих существующие и прогнозные запасы углеводородов в таких районах, как Арктика, Черноморско-Каспийский регион, Мировой океан в целом. Выбор регионов был связан со степенью и перспективностью их освоения, углеводородным потенциалом, наличием значительного существующего или прогнозного нефтяного загрязнения и ролью в мировой энергетике, геополитике.

В ходе работы были использованы следующие критерии включения: исследования должны были соответствовать поставленным задачами, быть первичными исследованиями, обзорами или отражать наиболее значимые особенности темы, быть опубликованными в рецензируемых изданиях и доступными в полном объеме.

Результаты исследования и их обсуждение

В настоящее время выделяются три основных направления развития добычи углеводородов в Мировом океане: освоение морской Арктики (выделение данного направления, по мнению авторов, обусловлено экономико-политическими причинами), континентального шельфа и возможность организации промышленной добычи в глубоководных районах Мирового океана. Выделенные направления

описаны и отмечены во многих работах [2–7]. Устремление вглубь Арктики и на шельф содержится также в стратегических документах России^{3–5}. Здесь мы лишь присоединяемся к выводам авторов и дополняем их в части вопросов об экологических рисках, безопасности и управлении при освоении углеводородных ресурсов в обозначенных направлениях. Отмечаем опасения по отношению к сохранности природной среды в указанных районах.

Интерес, который проявляется к вышеописанным направлениям, связан с их углеводородным потенциалом. Так, например, Арктика содержит огромные запасы нефти и газа, и по мере уменьшения толщины морского льда промышленность неизбежно будет стремиться к разработке разведанных месторождений. По данным Геологической службы Соединенных Штатов Америки (англ.: United States Geological Survey, USGS), Арктика содержит 13 % неоткрытых мировых запасов нефти и 30 % неоткрытых традиционных ресурсов природного газа, в основном (84 %) эти ресурсы расположены в прибрежных осадочных бассейнах. Между тем А. Э. Конторович и др. дают наиболее вероятную оценку ресурсов по российскому арктическому шельфу и глубоководным зонам Северного Ледовитого океана: это 52 млрд т нефти и конденсата (извлекаемые запасы) и 90 трлн м³ газа [3]. В настоящее время уже ведется разработка морских месторождений региона: первая морская арктическая буровая установка «Приразломная», эксплуатируемая российской газовой компанией «Газпром», начала добычу нефти в 2013 г. в Печорском море. США активно разрабатывают месторождение Норт-стар в море Бофорта, а Норвегия начала добычу природного газа на месторождении Снёвит в Баренцевом море в 2007 г. и добычу нефти на месторождении Голиаф в 2016 г. [8].

³ Об утверждении Энергетической стратегии Российской Федерации на период до 2035 года: распоряжение Правительства РФ от 09.06.2020 № 1523-р // Docs.cntd.ru. [Электронный ресурс]. URL: <https://docs.cntd.ru/document/565068231> (24.08.2021).

⁴ Об утверждении Стратегии развития минерально-сырьевой базы Российской Федерации до 2035 года: распоряжение Правительства РФ от 22.12.2018 № 2914-р // Docs.cntd.ru. [Электронный ресурс]. URL: <https://docs.cntd.ru/document/552051127> (24.08.2021).

⁵ Об утверждении Доктрины энергетической безопасности Российской Федерации: указ Президента РФ от 13.05.2019 № 216 // Docs.cntd.ru. [Электронный ресурс]. URL: <https://docs.cntd.ru/document/554531904> (24.08.2021).



Углеводородный потенциал частично связанного с Мировым океаном Черноморско-Каспийского региона – одного из самых освоенных и осваиваемых – считается в настоящее время до конца не исчерпанным. В акватории данного региона только в российском секторе Каспийского моря заключается более 0,3 млрд т нефти и 664,2 млрд м³ природного газа⁶. На данный момент в отмеченном секторе разрабатываются такие крупные месторождения, как им. Ю. Корчагина, Западно-Ракушечное, Центральное и др. Кроме того, в Каспийском море имеются месторождения-гиганты Тенгиз и Кашаган. По прогнозам Международного энергетического агентства, в результате проводимых на шельфе Каспия масштабных работ к 2035 г. доля Каспийского региона в мировом экспорте энергоносителей может достигнуть 9 % при сохранении существующего сценария развития отрасли [9]. Район Черного моря обладает значительными запасами природного газа и менее существенными запасами нефти. Так, по существующим данным, суммарные ресурсы Черного и Азовского морей оцениваются в 2 трлн м³ газа, 435 млн т нефти [10]. Между тем, необходимо отметить, что оценки содержания нефти в Черном море разнятся. Одно из относительно недавних исследований показывает, что в российской части Черного моря содержится порядка 600 млн т нефти [11]. Ввиду этого существует необходимость доизучения его углеводородного потенциала. Также необходимо отметить, что через Черное море пролегают важные транспортные коридоры поставок углеводородов.

Нефтегазоносный потенциал основных осадочных бассейнов шельфа Мирового океана, в свою очередь, в целом может ориентировочно оцениваться в 508,2 млрд т нефти, 638,7 трлн м³ газа (на 2013 г.) [12]. О реально же существующих запасах пока можно только догадываться, поэтому необходимо геологическое доизучение Мирового океана.

Для континентальных месторождений свойственно постепенное истощение, поэтому

неудивительно, что мы рассматриваем в качестве источника ископаемого топлива морскую среду и просторы океана. В данной работе мы ограничимся кратким обзором углеводородного потенциала некоторых частей Мирового океана и сопредельных территорий и далее перейдем к геоэкологическим аспектам.

Промышленное освоение Арктики или же продвижение в глубины океана неразрывно связано с повышением экологических и техногенных рисков (таблица). Одной из самых значительных опасностей являются разливы нефти, происходящие в результате прорыва скважин или во время движения танкеров [4]. С самых первых шагов в морской добыче и по настоящее время эта проблема остается актуальной. По различным оценкам, в морских экосистемах за последние пять лет было разлито более 40 тыс. т нефти [13]. Как указывают Б. Батстон и С. Белфорд [14], почти 48 % нефти попадает в океаны в результате разливов и незаконных сбросов с судов. Главным побочным эффектом от разливов для живых организмов становится формирование зон гипоксии, при котором в морской воде создается слой, препятствующий прохождению кислорода, что в итоге приводит к гибели организмов. Имеются в наличии и данные о том, что отдельные соединения нефти (например, полициклические ароматические углеводороды) обладают мутагенным и генотоксическим действием за счет образования аддуктов дезоксирибонуклеиновой кислоты [15]. В этом ключе интересны исследования [16–18], которые более подробно описывают механизмы воздействия нефти на обитателей морской среды.

На видовое разнообразие оказывают воздействие и проводимые буровые работы. Существующие эксперименты по изучению воздействия отложений от морских буровых работ, в том числе от большого количества бурового шлама, показали значительное снижение количества таксонов, численности, биомассы и разнообразия в случае, если шлам добавлялся к естественным порогам седиментации [24]. Кроме того, аккумуляция

⁶ О состоянии и использовании минерально-сырьевых ресурсов Российской Федерации в 2019 году: государственный доклад Министерства природных ресурсов и экологии Российской Федерации // Mnr.gov.ru. [Электронный ресурс]. URL: https://www.mnr.gov.ru/docs/o_sostoyanii_i_ispolzovaniii_mineralno_syrevykh_resursov_rossiyskoy_federatsii/gosudarstvennyy_doklad_o_sostoyanii_i_ispolzovaniii_mineralno_syrevykh_resursov_rossiyskoy_federatsii/ (24.08.2021).



Ключевые существующие и потенциальные экологические и техногенные риски, а также их последствия при морской добыче
Key existing and potential environmental and anthropogenic risks and their consequences in offshore mining

Арктика (прибрежная и морская часть)	Континентальный шельф	Глубоководные районы океана
	Взрывы и утечки с нефте- и газопроводов	Изменения топографии и геохимических характеристик морского дна
	Столкновение судов со льдами	
	Изъятие и перемещение грунтов при строительстве платформ и нефтяных терминалов, укладке трубопроводов	Снижение устойчивости морского дна
	Эвтрофирование прибрежных вод	
	Выбросы с судов, платформ и загрязнение воздуха при добыче и транспортировке полезных ископаемых	
	Столкновение судов с морскими нефтяными сооружениями (установками), аварийные разливы нефти, возгорания, формирование зон гипоксии	
	Изменение путей миграции морских видов и их разнообразия	
	Непреднамеренное вселение (инвазия) чужеродных видов из других морских регионов при сбросе балластных вод из нефтяных танкеров	
	«Акустическое загрязнение» водных масс	
	Деградация морской среды обитания	

Примечание. Составлено по материалам источников [5, 19–23].

Note. Compiled from the sources [5, 19–23].

данных растворов или их составляющих приводит к повышению общего органического углерода и формированию бескислородных условий [22, 25]. Здесь необходимо особо обратить внимание на моря северных широт, наполненные множеством видов, которые, как правило, обладают незначительными размерами, ограниченной гибкостью, малоподвижны и обитают преимущественно близко к дну [26]. Они представляются теми, кто попадает в зону риска при организации глубинного бурения и добычи ресурсов со дна, что в итоге должно являться основанием для тщательного и обоснованного выбора участка для будущего морского нефтегазового комплекса. Не учитывать такой фактор, на наш взгляд, невозможно.

Для морской экосистемы, помимо всего прочего, важен и показатель шума. Разведка и разработка всегда сопровождаются звуковым воздействием на окружающее пространство. Соответственно, возникающее шумовое загрязнение, например при организации подводной добычи, ввиду того, что звуковые волны в толще морской воды распространяются на большие расстояния от их источника, непосредственно будет воздействовать на виды, наиболее чувствительные к увеличению подводного шума, переменив его частот.

В этом контексте необходимо обратить внимание на исследование Э. Хокинса и А. Поппера [27] о подходах к оценке воздействия подводного шума на морских рыб и беспозвоночных. К наиболее важным, на наш взгляд, выводам авторов работы можно отнести утверждения о необходимости проведения исследований поведения и слуха у рыб и беспозвоночных в акустической среде, максимально приближенной к их естественной среде обитания, с целью уточнения реакции живых организмов на шум на различных глубинах, а также о том, что технологии по моделированию распространения звука и его поведению в морской среде развиты недостаточно и / или их исследования проводились на недостаточном уровне для того, чтобы сложить цельную картину о природе распространения звука в данном виде среды.

В качестве еще одного аспекта нам также хотелось бы осветить воздействие добычи на геологическую среду. Так, например, известным негативным явлением, сопровождающим разработку многих месторождений на акваториях и суше, является значительное проседание морского дна или поверхности суши при разработке залежей, возникающее за счет уплотнения резервуара при извлечении углеводородов, которое сопровождается падением



пластового давления. Такие процессы выявлены на ряде морских месторождений Норвегии (Экофиск, Валхалл), на прибрежных месторождениях в США (Уилмингтон), в Черноморско-Каспийском районе (Сураханы, Тенгиз). Проблема проседания в районе месторождения Экофиск – одна из самых старых и известных. К 1987 г. в центральной части месторождения морское дно просело более чем на 3 м, а к 2013 г. – более чем на 10 м [28]. Необходимо также отметить, что морская добывчая инфраструктура обладает и повышенными нагрузками на грунт [29], что вносит свой вклад в увеличение воздействия (давления) на геологическую среду. Таким образом, можно проследить взаимосвязанную цепочку операций, которую мы наглядно изобразили в виде рисунка.

В Мировом океане также развиты оползневые процессы (например, подводные оползни в Северном море, Северо-восточный Атлантике), тектонические сдвиги и землетрясения (например, в Тихом и Индийском океанах), склоновые и другие геопроцессы [5], и нельзя исключать возможность связи между добычей и активизацией отмеченных процессов. Однако в настоящее время данная проблема применительно к морским условиям до сих пор остается малоизученной. Несмотря на это очевидно, что данные процессы оказывают влияние на особенности миграции видов и, кроме прочего, на состояние самих нефтегазовых сооружений, а также повышают риск возникновения техногенных аварий.

Отдельным вопросом является также организация добычи в глубоководных районах Мирового океана. Здесь существует ряд принципиальных и нерешенных проблем.

Во-первых, человеческие знания о глубинах Мирового океана до сих пор малы и обрывочны. Так, в Докладе о науке в Мировом океане за 2017 г. отмечено, что многим странам

не хватает фундаментальных научных знаний о нем и это не позволяет организовывать эффективное управление океаническими ресурсами [30]. В настоящий момент отсутствуют и исследования о возможных возмущениях океана в случае промышленной добычи [31]. Более того, не располагаем мы и достоверными данными о запасах полезных ископаемых, в том числе углеводородов, в его толщах, что отмечалось и ранее. Эти и другие вопросы рождают необходимость увеличения масштабов изучения Мирового океана, а также уточнения уже известного о нем.

Во-вторых, научно-технологические возможности организации бурения в морской среде и на больших глубинах на данный момент ограничены. Причина тому – уровень технико-технологического развития, недостаток знаний о глубинном бурении и процессах, протекающих в Мировом океане. Поэтому стоит принять во внимание, что в случае организации широкой (промышленной) глубоководной добычи (бурения) необходимо рассмотреть возможность типизации морской территории с целью выделения зон, в которых добыча нецелесообразна, исходя из геологических критериев (в качестве таких критериев могут выступать, например, степень проявления геопроцессов, богатое видовое или популяционное биоразнообразие, уникальные морские ландшафты, представляющие экологическую и научную ценность, территории традиционного природопользования).

В-третьих, большая часть Мирового океана является достоянием всего человечества и не находится под юрисдикцией какой-либо одной страны или группы стран. В ряде работ [32, 33] отмечается, что сегодня правовые проблемы организации добычи полезных ископаемых в Мировом океане до сих пор не разрешены, что приводит или может приводить к спорам и конфликтам между государ-



Простейшая принципиальная схема взаимосвязи добычи, геологической среды и загрязнения
(составлена авторами)

Elementary schematic diagram of mining, geological environment and pollution relationship
(compiled by the authors)



ствами или добывающими компаниями. Необходимо уточнить, что здесь имеются в виду территориальные притязания, вопросы границ и собственности ресурсов. Так, например, в настоящее время Канада, Королевство Дания и Российская Федерация утверждают, что хребет Ломоносова является продолжением их собственного континентального шельфа, в то время как Соединенные Штаты Америки заявляют, что это океанический хребет, а следовательно, он по определению не может быть продолжением континентального шельфа какого-либо государства. Между Канадой и Данией также ведется спор о линии разграничения на острове Ганса и в море Линкольна [34].

Подобные споры существуют и районах Тихого океана. Новая Зеландия, Соломоновы Острова, Папуа – Новая Гвинея, Федеральные Штаты Микронезии, Республика Фиджи, Республика Вануату и Острова Кука, Республика Кирибати и Тувалу заявляют свои права на внешний континентальный шельф [35]. К наиболее старым и неразрешенным конфликтам относится и спор о морских границах в Южно-Китайском море [36]. Таким образом, можно видеть, что нормы морского права и международного права сталкиваются с интересами государств.

Гипотетическая попытка разделения на национальные сектора видится сомнительной ввиду того, что нет четкого механизма, который позволил бы это сделать. Действующая Конвенция Организации Объединенных Наций по морскому праву (англ.: United Nations Convention on the Law of the Sea, UNCLOS), например, оставляет в введении государств континентальный шельф, внешнюю экономическую зону. При этом нормы, касающиеся использования «района» (отдельно выделенных областей морского дна, которые не находятся под юрисдикцией государств), очень обширны, а существующие правила делают акцент на редкоземельных и тяжелых металлах. Кроме того, положения упомянутой Конвенции подвергаются сомнениям со стороны ряда государств (например, США, Турции, Ирана и др.), которые так и не подписали или не ратифицировали ее.

В качестве же последнего, но, наверное, самого главного пункта авторам данного исследования хотелось бы отметить, что Мировой океан – это уникальнейшая, неповторимая экосистема, жизненно необходимая для человека и планеты. Факты антропогенного давления на него в настоящее время уже многочисленны. Авторы остановились лишь на некоторых из них. И стоит полагать, что без экосистемного и риск-ориентированного подхода освоение ресурсов – в первую очередь минеральных – дна этой части планеты нецелесообразно или по крайней мере затруднительно и возможно только в отдаленной перспективе.

Заключение

Предлагаемая работа не является всеобъемлющим обзором о воздействии нефтегазовой отрасли на морские экосистемы и прибрежные территории. Скорее, она резюмирует наиболее актуальные проблемы, определяет ключевые пробелы в наших знаниях о морской и океанической среде. В частности, можно заключить, что наиболее актуальными среди существующих проблем, можно даже сказать, вызовами являются: поиск новых технологий для добычи в глубоководных районах Мирового океана в случае, если будет принят консенсус о целесообразности такой добычи; малоизученность просторов Мирового океана; поиск пути баланса между потребностями общества в сырье и сохранением биоразнообразия, особенно в чувствительных морских экосистемах; совершенствование методик предотвращения техногенных аварий и катастроф, управления экологическими рисками (необходимость перехода на экосистемные и риск-ориентированные подходы). Стоит отметить, что даже с учетом возможности снижения роли нефтегазовой отрасли и перехода к низкоуглеродной политике вопросы нефтяного загрязнения остаются актуальными, а от решения отмеченных проблем будет зависеть то, какое место углеводороды займут в будущем в мировой энергетике и удержат ли они свое преимущество.



Список источников

1. Мастепанов А. М. От ковидного «сегодня» к низкоуглеродному «завтра»: анализ зарубежных прогнозов развития мировой энергетики // Георесурсы. 2021. Т. 23. № 3. С. 42–52. <https://doi.org/10.18599/grs.2021.3.7>.
2. Guilhon M., Montserrat F., Turra A. Recognition of ecosystem-based management principles in key documents of the seabed mining regime: implications and further recommendations // ICES Journal of Marine Science. 2021. Vol. 78. Iss. 3. P. 884–899. <https://doi.org/10.1093/icesjms/fsaa229>.
3. Прищепа О. М., Нефедов Ю. В., Григорьев Г. А. Перспективы дальнейшего изучения и освоения углеводородного потенциала арктического шельфа Печоро-Баренцевоморского региона // Научный журнал российского газового общества. 2019. № 3-4. С. 5–20.
4. Edwards R., Evans A. The challenges of marine spatial planning in the Arctic: Results from the ACCESS programme // Ambio. 2017. Vol. 46. P. 486–496. <https://doi.org/10.1007/s13280-017-0959-x>.
5. Ehlers P. Blue growth and ocean governance – how to balance the use and the protection of the seas // WMU Journal of Maritime Affairs. 2016. Vol. 15. P. 187–203. <https://doi.org/10.1007/s13437-016-0104-x>.
6. Petrick S., Riemann-Campe K., Hoog S., Growitsch C., Schwind H., Gerdeset R., et al. Climate change, future Arctic Sea ice, and the competitiveness of European Arctic offshore oil and gas production on world markets // Ambio. 2017. Vol. 46. P. 410–422. <https://doi.org/10.1007/s13280-017-0957-z>.
7. Tanaka Y., Martinez Romera B. Emerging issues on arctic environmental and climate change governance: introduction // The International Journal of Marine and Coastal Law. 2020. Vol. 35. Iss. 3. P. 429–438. <https://doi.org/10.1163/15718085-BJA10034>.
8. Harris P. T., Macmillan-Lawler M., Kullerud L., Rice J. C. Arctic marine conservation is not prepared for the coming melt // ICES Journal of Marine Science. 2018. Vol. 75. Iss. 1. P. 61–71. <https://doi.org/10.1093/icesjms/fsx153>.
9. Рубан Л. С. Обеспечение энергетической и экологической безопасности Каспийского региона // Экологический вестник России. 2013. № 11. С. 26–29.
10. Виноградов О. Нефть и газ Крыма: потери и приобретения // Нефтегазовая вертикаль. 2014. № 8. С. 4–7.
11. Немировская И. А. Уровни и генезис углеводородов в прибрежных районах российского сектора Черного моря // Труды Государственного океанографического института. 2019. № 220. С. 221–243.
12. Истратов И. В. Нефтегазоносность и ресурсный потенциал основных осадочных бассейнов Мирового океана // Научно-технический сборник «Вести газовой науки». 2013. № 5. С. 32–42.
13. Arora N. K. Bioremediation: a green approach for restoration of polluted ecosystems // Environmental Sustainability. 2018. Vol. 1. P. 305–307. <https://doi.org/10.1007/s42398-018-00036-y>.
14. Batstone B., Belford S. Oil and gas: exploration and risk // The future of ocean governance and capacity development. Leiden: Brill – Nijhoff, 2019. P. 401–406.
15. Duran R., Cravo-Laureau C. Role of environmental factors and microorganisms in determining the fate of polycyclic aromatic hydrocarbons in the marine environment // FEMS Microbiology Reviews. 2016. Vol. 40. Iss. 6. P. 814–830. <https://doi.org/10.1093/femsre/fuw031>.
16. Balk L., Hylland K., Hansson T., Berntssen M. H. G., Beyer J., Jonsson G., et al. Biomarkers in natural fish populations indicate adverse biological effects of offshore oil production // PLoS ONE. 2011. Vol. 6. Iss. 5. P. e19735. <https://doi.org/10.1371/journal.pone.0019735>.
17. Main C. E., Ruhl H. A., Jones D. O. B., Yool A., Thornton B., Mayor D. J. Hydrocarbon contamination affects deep-sea benthic oxygen uptake and microbial community composition // Deep-Sea Research. Part I: Oceanographic Research Papers. 2015. Vol. 100. P. 79–87. <https://doi.org/10.1016/j.dsr.2014.12.008>.
18. Sørhus E., Incardona J. P., Karlsen Ø., Linbo T., Sørensen L., Nordtug T., et al. Crude oil exposures reveal roles for intracellular calcium cycling in haddock craniofacial and cardiac development // Scientific Reports. 2016. Vol. 6. P. 31058. <https://doi.org/10.1038/srep31058>.
19. Roux S., Horsfield C. Chapter 13. Review of national legislations applicable to seabed mineral resources exploitation // The law of the seabed / ed. C. Banet. Leiden: Brill – Nijhoff, 2020. P. 287–314.
20. Bashir I., Lone F. A., Bhat R. A., Mir S. A., Dar Z. A., Dar S. A. Concerns and threats of contamination on aquatic ecosystems // Bioremediation and biotechnology / eds. K. R. Hakeem, R. A. Bhat, H. Qadri. Cham: Springer, 2020. P. 1–26.
21. Gómez C., Green D. R. Small unmanned airborne systems to support oil and gas pipeline monitoring and mapping // Arabian Journal of Geosciences. 2017. Vol. 10. P. 202. <https://doi.org/10.1007/s12517-017-2989-x>.
22. Ramirez-Llodra E. Chapter 2. Deep-sea ecosystems: biodiversity and anthropogenic impacts // The law of the seabed / ed. C. Banet. Leiden: Brill – Nijhoff, 2020. P. 36–60.
23. Hassel M., Utne I. B., Vinnem J. E. Allision risk analysis of offshore petroleum installations on the Norwegian Continental Shelf – an empirical study of vessel traffic patterns // WMU Journal of Maritime Affairs. 2017. Vol. 16. P. 175–195. <https://doi.org/10.1007/s13437-016-0123-7>.
24. Carpenter A. Oil pollution in the North Sea: the impact of governance measures on oil pollution over several decades // Hydrobiologia. 2019. Vol. 845. P. 109–127. <https://doi.org/10.1007/s10750-018-3559-2>.
25. Ramirez-Llodra E., Tyler P. A., Baker M. C., Bergstad O. A., Clark M. R., Escobar E., et al. Man and the last great wilderness: human impact on the deep sea // PLoS ONE. 2011. Vol. 6. Iss. 8. P. e22588. <https://doi.org/10.1371/journal.pone.0022588>.
26. Skern-Mauritzen M., Olsen E., Huse G. Opportunities for advancing ecosystem-based management in a rapidly changing, high latitude ecosystem // ICES Journal of Marine Science. 2018. Vol. 75. Iss. 7. P. 2425–2433. <https://doi.org/10.1093/icesjms/fsy150>.
27. Hawkins A. D., Popper A. N. A sound approach to assessing the impact of underwater noise on marine fishes and invertebrates // ICES Journal of Marine Science.



2017. Vol. 74. Iss. 3. P. 635–651. <https://doi.org/10.1093/icesjms/fs205>.

28. Керимов В. Ю., Сенин Б. В., Богоявленский В. И., Шилов Г. Я. Геология, поиски и разведка месторождений углеводородов на акваториях Мирового океана: монография. М.: Недра, 2016. 410 с.

29. Braathen A., Brekke, H. Chapter 1. Characterizing the seabed: a geoscience perspective // The law of the seabed / ed. C. Banet. Leiden: Brill – Nijhoff, 2020. P. 21–35.

30. Winther J.-G., Dai M., Rist T., Hoel A. H., Li Y., Trice A., et al. Integrated ocean management for a sustainable ocean economy // *Nature Ecology & Evolution*. 2020. Vol. 4. P. 1451–1458. <https://doi.org/10.1038/s41559-020-1259-6>.

31. Levin L. A., Amon D. J., Lily H. Challenges to the sustainability of deep-seabed mining // *Nature Sustainability*. 2020. Vol. 3. P. 784–794. <https://doi.org/10.1038/s41893-020-0558-x>.

32. Ranganathan S. Ocean floor grab: international law and the making of an extractive imaginary // *European*

Journal of International Law. 2019. Vol. 30. Iss. 2. P. 573–600. <https://doi.org/10.1093/ejil/chz027>.

33. Queffelec B., Bonnin M., Ferreira B., Bertrand S., Da Silva S. T., Diouf F., et al. Marine spatial planning and the risk of ocean grabbing in the tropical Atlantic // *ICES Journal of Marine Science*. 2021. Vol. 78. Iss. 4. P. 1196–1208. <https://doi.org/10.1093/icesjms/fsab006>.

34. Skaridov A. S. Chapter 5. The seabed in the High North – how to address conflicts? // *The law of the seabed* / ed. C. Banet. Leiden: Brill – Nijhoff, 2020. P. 104–124.

35. Jenisch U. K. Old laws for new risks at sea: mineral resources, climate change, sea lanes, and cables // *WMU Journal of Maritime Affairs*. 2012. Vol. 11. P. 169–185. <https://doi.org/10.1007/s13437-012-0018-1>.

36. Werle D., Boudreau P. R., Brooks M. R., Butler M. J. A., Charles A., Coffen-Smout S., et al. Looking ahead: ocean governance challenges in the twenty-first century // *The future of ocean governance and capacity development*. Leiden: Brill – Nijhoff, 2019. P. 533–542.

References

1. Mastepanov A. M. From Covid “today” to low-carbon “tomorrow”: analysis of foreign forecasts for the development of world energy. *Georesursy*. 2021;23(3):42-52. (In Russ.). <https://doi.org/10.18599/grs.2021.3.7>.
2. Guilhon M., Montserrat F., Turra A. Recognition of ecosystem-based management principles in key documents of the seabed mining regime: implications and further recommendations. *ICES Journal of Marine Science*. 2021;78(3):884-899. <https://doi.org/10.1093/icesjms/fsaa229>.
3. Prishchepa O. M., Nefedov Y. V., Grigoriev G. A. Prospects for further study and development of the hydrocarbon potential of the Russian arctic shelf. *Nauchnyi zhurnal rossiiskogo gazovogo obshchestva = Scientific Journal of the Russian Gas Society*. 2019;3-4:5-20. (In Russ.).
4. Edwards R., Evans A. The challenges of marine spatial planning in the Arctic: Results from the ACCESS programme. *Ambio*. 2017;46:486-496. <https://doi.org/10.1007/s13280-017-0959-x>.
5. Ehlers P. Blue growth and ocean governance – how to balance the use and the protection of the seas. *WMU Journal of Maritime Affairs*. 2016;15:187-203. <https://doi.org/10.1007/s13437-016-0104-x>.
6. Petrick S., Riemann-Campe K., Hoog S., Growitsch C., Schwind H., Gerdeset R., et al. Climate change, future Arctic Sea ice, and the competitiveness of European Arctic offshore oil and gas production on world markets. *Ambio*. 2017;46:410-422. <https://doi.org/10.1007/s13280-017-0957-z>.
7. Tanaka Y., Martinez Romera B. Emerging issues on arctic environmental and climate change governance: introduction. *The International Journal of Marine and Coastal Law*. 2020;35(3):429-438. <https://doi.org/10.1163/15718085-BJA10034>.
8. Harris P. T., Macmillan-Lawler M., Kullerud L., Rice J. C. Arctic marine conservation is not prepared for the coming melt. *ICES Journal of Marine Science*. 2018;75(1):61-71. <https://doi.org/10.1093/icesjms/fsx153>.
9. Ruban L. S. Ensuring energy and environmental security in the Caspian region. *Ekologicheskii vestnik Rossii*. 2013;11:26-29. (In Russ.).
10. Vinogradov O. Crimean oil and gas: losses and gains. *Neftegazovaya vertikal'*. 2014;8:4-7. (In Russ.).
11. Nemirovskaya I. A. Levels and genesis of hydrocarbons in coastal areas of the Russian sector of the Black Sea. *Trudy Gosudarstvennogo okeanograficheskogo instituta*. 2019;220:221-243. (In Russ.).
12. Istratov I. V. Oil and gas content and resource potential of major sedimentary basins in the World ocean. *Nauchno-tehnicheskii sbornik "Vesti gazovoy nauki"*. 2013;5:32-42. (In Russ.).
13. Arora N. K. Bioremediation: a green approach for restoration of polluted ecosystems. *Environmental Sustainability*. 2018;1:305-307. <https://doi.org/10.1007/s42398-018-00036-y>.
14. Batstone B., Belford S. Oil and gas: exploration and risk. In: *The future of ocean governance and capacity development*. Leiden: Brill – Nijhoff, 2019. p.401–406.
15. Duran R., Cravo-Laureau C. Role of environmental factors and microorganisms in determining the fate of polycyclic aromatic hydrocarbons in the marine environment. *FEMS Microbiology Reviews*. 2016;40(6):814-830. <https://doi.org/10.1093/femsre/fuw031>.
16. Balk L., Hylland K., Hansson T., Berntssen M. H. G., Beyer J., Jonsson G., et al. Biomarkers in natural fish populations indicate adverse biological effects of offshore oil production. *PLoS ONE*. 2011;6(5):e19735. <https://doi.org/10.1371/journal.pone.0019735>.
17. Main C. E., Ruhl H. A., Jones D. O. B., Yool A., Thornton B., Mayor D. J. Hydrocarbon contamination affects deep-sea benthic oxygen uptake and microbial community composition. *Deep-Sea Research. Part I: Oceanographic Research Papers*. 2015;100:79-87. <https://doi.org/10.1016/j.dsr.2014.12.008>.
18. Sørhus E., Incardona J. P., Karlsen Ø., Linbo T., Sørensen L., Nordtug T., et al. Crude oil exposures reveal roles for intracellular calcium cycling in haddock craniofacial and cardiac development. *Scientific Reports*. 2016;6:



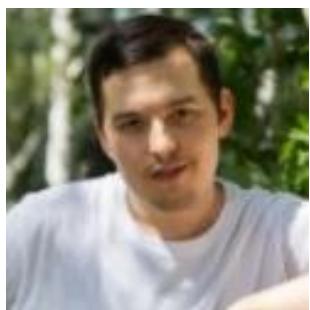
31058. <https://doi.org/10.1038/srep31058>.
19. Roux S., Horsfield C. Chapter 13. Review of national legislations applicable to seabed mineral resources exploitation. In: Banet C. (ed.). *The law of the seabed*. Leiden: Brill – Nijhoff; 2020. p.287–314.
20. Bashir I., Lone F. A., Bhat R. A., Mir S. A., Dar Z. A., Dar S. A. Concerns and threats of contamination on aquatic ecosystems. In: Hakeem K. R., Bhat R. A., Qadri H. (eds.). *Bioremediation and biotechnology*. Cham: Springer; 2020. p.1–26.
21. Gómez C., Green D. R. Small unmanned airborne systems to support oil and gas pipeline monitoring and mapping. *Arabian Journal of Geosciences*. 2017;10:202. <https://doi.org/10.1007/s12517-017-2989-x>.
22. Ramirez-Llodra E. Chapter 2. Deep-sea ecosystems: biodiversity and anthropogenic impacts. In: Banet C. (ed.). *The law of the seabed*. Leiden: Brill – Nijhoff; 2020. p.36–60.
23. Hassel M., Utne I. B., Vinnem J. E. Allision risk analysis of offshore petroleum installations on the Norwegian Continental Shelf – an empirical study of vessel traffic patterns. *WMU Journal of Maritime Affairs*. 2017;16:175–195. <https://doi.org/10.1007/s13437-016-0123-7>.
24. Carpenter A. Oil pollution in the North Sea: the impact of governance measures on oil pollution over several decades. *Hydrobiologia*. 2019;845:109–127. <https://doi.org/10.1007/s10750-018-3559-2>.
25. Ramirez-Llodra E., Tyler P. A., Baker M. C., Bergstad O. A., Clark M. R., Escobar E., et al. Man and the last great wilderness: human impact on the deep sea. *PLoS ONE*. 2011;6(8):e22588. <https://doi.org/10.1371/journal.pone.0022588>.
26. Skern-Mauritzen M., Olsen E., Huse G. Opportunities for advancing ecosystem-based management in a rapidly changing, high latitude ecosystem. *ICES Journal of Marine Science*. 2018;75(7):2425–2433. <https://doi.org/10.1093/icesjms/fsy150>.
27. Hawkins A. D., Popper A. N. A sound approach to assessing the impact of underwater noise on marine fishes and invertebrates. *ICES Journal of Marine Science*. 2017;74(3):635–651. <https://doi.org/10.1093/icesjms/fsw205>.
28. Kerimov V. Yu., Senin B. V., Bogoyavlenskii V. I., Shilov G. Ya. *Geology, prospecting and exploration of hydrocarbon deposits in the World ocean*. Moscow: Nedra; 2016. 410 p. (In Russ.).
29. Braathen A., Brekke, H. Chapter 1. Characterizing the seabed: a geoscience perspective. In: Banet C. (ed.). *The law of the seabed*. Leiden: Brill – Nijhoff; 2020. p.21–35.
30. Winther J.-G., Dai M., Rist T., Hoel A. H., Li Y., Trice A., et al. Integrated ocean management for a sustainable ocean economy. *Nature Ecology & Evolution*. 2020;4:1451–1458. <https://doi.org/10.1038/s41559-020-1259-6>.
31. Levin L. A., Amon D. J., Lily H. Challenges to the sustainability of deep-seabed mining. *Nature Sustainability*. 2020;3:784–794. <https://doi.org/10.1038/s41893-020-0558-x>.
32. Ranganathan S. Ocean floor grab: international law and the making of an extractive imaginary. *European Journal of International Law*. 2019;30(2):573–600. <https://doi.org/10.1093/ejil/chz027>.
33. Queffelec B., Bonnin M., Ferreira B., Bertrand S., Da Silva S. T., Diouf F., et al. Marine spatial planning and the risk of ocean grabbing in the tropical Atlantic. *ICES Journal of Marine Science*. 2021;78(4):1196–1208. <https://doi.org/10.1093/icesjms/fsab006>.
34. Skaridov A. S. Chapter 5. The seabed in the High North – how to address conflicts? In: Banet C. (ed.). *The law of the seabed*. Leiden: Brill – Nijhoff; 2020. p.104–124.
35. Jenisch U. K. Old laws for new risks at sea: mineral resources, climate change, sea lanes, and cables. *WMU Journal of Maritime Affairs*. 2012;11:169–185. <https://doi.org/10.1007/s13437-012-0018-1>.
36. Werle D., Boudreau P. R., Brooks M. R., Butler M. J. A., Charles A., Coffen-Smout S., et al. Looking ahead: ocean governance challenges in the twenty-first century. In: *The future of ocean governance and capacity development*. Leiden: Brill – Nijhoff; 2019. p.533–542.

Информация об авторах / Information about the authors



Экзарьян Владимир Нишанович,
доктор геолого-минералогических наук, профессор,
заслуженный эколог Российской Федерации,
заведующий кафедрой экологии и природопользования,
Российский государственный геологоразведочный университет
им. Серго Орджоникидзе,
г. Москва, Россия,
ekzaryanvn@mgri.ru,
<https://orcid.org/0000-0003-3961-8003>.

Vladimir N. Ekzaryan,
Dr. Sci. (Geol. & Mineral.), Professor,
Honored Ecologist of the Russian Federation,
Head of the Department of Ecology and Nature Management,
Sergo Ordzhonikidze Russian State University for Geological Prospecting,
Moscow, Russia,
ekzaryanvn@mgri.ru,
<https://orcid.org/0000-0003-3961-8003>.



Ахмадиев Артур Константинович,
преподаватель кафедры экологии и природопользования,
Российский государственный геологоразведочный университет
им. Серго Орджоникидзе,
г. Москва, Россия,
akhmadievak@mgri.ru,
<https://orcid.org/0000-0002-3388-4354>.

Arthur K. Akhmadiev,
Lecturer of the Department of Ecology and Nature Management,
Sergo Ordzhonikidze Russian State University for Geological Prospecting,
Moscow, Russia,
akhmadievak@mgri.ru,
<https://orcid.org/0000-0002-3388-4354>.

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 22.09.2021; одобрена после рецензирования 28.10.2021; принятая к публикации 30.11.2021.
The article was submitted 22.09.2021; approved after reviewing 28.10.2021; accepted for publication 30.11.2021.



КРАТКАЯ ИНФОРМАЦИЯ О НОВЫХ ПУБЛИКАЦИЯХ

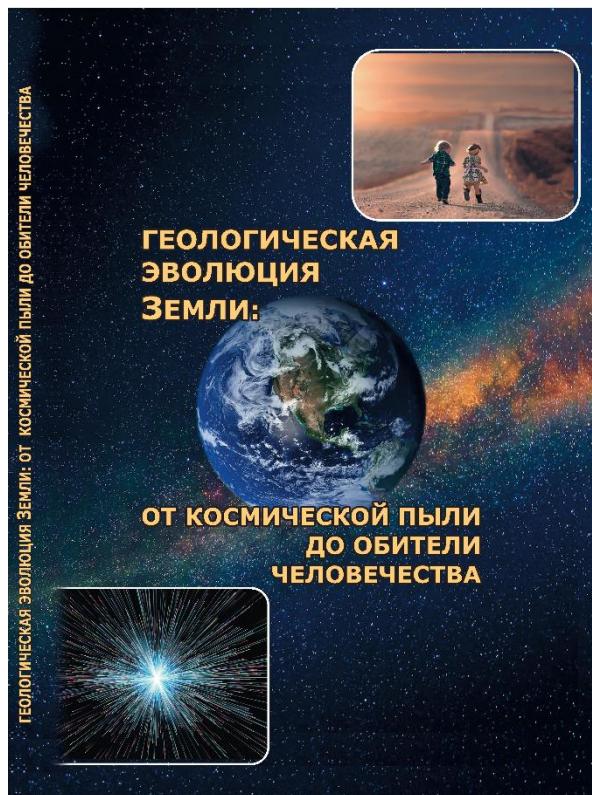
Геологическая история Земли – от зарождения до наших дней

В октябре 2021 года вышла в свет монография М. И. Кузьмина, В. В. Ярмоляка, Д. П. Гладкочуба, Н. А. Горячева, А. П. Деревянко, А. Н. Диценко, Т. В. Донской, В. А. Кравчинского, А. Р. Оганова, С. А. Писаревского «Геологическая эволюция Земли: от космической пыли до обители человечества» под редакцией академика Российской академии наук М. И. Кузьмина и академика Российской академии наук В. В. Ярмоляка. В монографии рассмотрена геологическая история Земли от ее зарождения до настоящего времени.

BRIEF INFORMATION ABOUT NEW PUBLICATIONS

Geological history of the Earth – from its formation to the present day

In October 2021, a monograph “Geological evolution of the Earth: from space dust to the home of mankind” by M. I. Kuzmin, V. V. Yarmolyuk, D. P. Gladkochub, N. A. Goryachev, A. P. Derevyanko, A. N. Didenko, T. V. Donskoy, V. A. Kravchinsky, A. R. Oganov, S. A. Pisarevsky edited by the Academician of the Russian Academy of Sciences M. I. Kuzmin and the Academician of the Russian Academy of Sciences V. V. Yarmolyuk was published. The monograph discusses the geological history of the Earth from its formation to the present day.



В октябре 2021 года издательством «ГЕО» была выпущена монография М. И. Кузьмина, В. В. Ярмоляка, Д. П. Гладкочуба, Н. А. Горячева, А. П. Деревянко, А. Н. Диценко, Т. В. Донской, В. А. Кравчинского, А. Р. Оганова, С. А. Писаревского «Геологическая эволюция

Земли: от космической пыли до обители человечества»¹. В представленном материале мы хотели бы кратко осветить основные проблемы, поднятые в монографии, в последовательности их рассмотрения.

¹ Кузьмин М. И., Ярмоляк В. В., Гладкочуб Д. П., Горячев Н. А., Деревянко А. П., Диценко А. Н., Донская Т. В., Кравчинский В. А., Оганов А. Р., Писаревский С. А. Геологическая эволюция Земли: от космической пыли до обители человечества. Новосибирск: ГЕО, 2021. 325 с.



1. Планеты типа Земли не могли появиться в ранней Вселенной. Ведь после Большого взрыва, породившего Вселенную 13,8 млрд лет назад, последняя содержала только водород и гелий. В ядрах звезд эти два элемента участвовали в термоядерных реакциях, порождавших другие химические элементы. При взрыве сверхновых звезд новообразованные элементы рассеивались в межзвездном пространстве, постепенно обогащая его материалом, необходимым для появления планет, подобных Земле.

2. Солнечная система возникла спустя 9 млрд лет после зарождения Вселенной, когда в ней накопились в достаточном количестве различные химические элементы. Она образовалась в 27 тыс. световых лет от центра галактики Млечный Путь в зоне (между 23 и 30 тыс. световых лет), которая считается наиболее благоприятной для появления «жизни» на планетах звездной системы.

3. В начальный (или хаотичный) эон развития Солнечной системы на ее периферии, обогащенной водой и газами, сформировались крупные планеты Юпитер и Сатурн. Их

перемещение в пределах протопланетного облака способствовало перераспределению вещества и поступлению во внутренние участки системы «строительного» (метеориты) материала, послужившего основой для образования каменных планет – Меркурия, Венеры, Земли и Марса.

4. Хаотичный эон в истории Земли охватил интервал времени от 4,567–4,5 млрд лет назад. В это время в недрах планеты сформировались жидкое железо-никелевое ядро и мантия (рис. 1). В строении последней вследствие фазовых преобразований минералов обособились верхняя (до глубины 670 км) и нижняя (более глубокая) мантия.

5. Около 4,51 млрд лет назад произошло одно из важнейших событий в истории Земли – столкновение с планетоидом Тейя, которое привело к образованию Луны и изменило наклон земной орбиты. Ядра планет слились, а их каменные оболочки были частично рассеяны и послужили основой для образования Луны и каменных астероидов, которые на протяжении гадейского периода бомбардировали планеты земной группы.

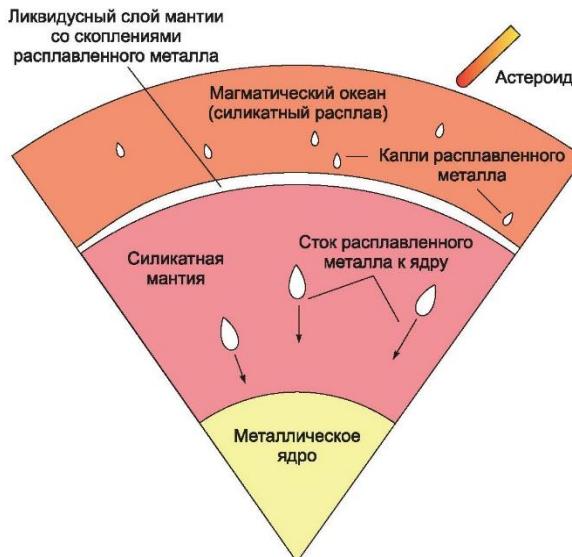


Рис. 1. Формирование мантии и ядра на фоне бомбардировок Протоземли астероидно-метеоритными телами

Энергия соударения астероидов с Землей приводила к формированию больших магматических бассейнов глубиной до 400–700 км. Капли сидерофильных элементов образовывались при плавлении железокаменного вещества астероидов (метеоритов) и погружались до дна магматического бассейна, где формировали скопления расплавленного металла, которые погружались через нижнюю мантию, наращивая ядро

Fig. 1. Formation of mantle and core in the midst of Proto-Earth bombardment by asteroid-meteorite bodies

The collision energy of asteroids and the Earth led to the formation of large magmatic basins up to 400–700 km deep.

Drops of siderophilic elements were formed under the melting of iron-stone matter of asteroids (meteorites) and sank to the bottom of the magma basin, where they formed accumulations of molten metal.

The latter sank through the lower mantle increasing the core



6. Геологическая история Земли началась с гадейского эона (4,5–4 млрд лет назад), в течение которого планета подвергалась постоянным метеоритным бомбардировкам. Они стимулировали крупнообъемные излияния ультраосновных – основных магм. Дифференциация этих магм вела к появлению кислых расплавов, от которых сохранились лишь цирконы возрастом 4,4–4 млрд лет. Первичная кора гадейского эона была практически полностью уничтожена непрекращавшимися метеоритными бомбардировками. Дошедшие до нас гадейские цирконы сохранились при редиклинге и полной переработке гадейской коры.

С прекращением бомбардировок закончился гадейский эон, и Земля вступила на путь внутренней самоорганизации, которая была связана с потерей тепла, ведущей к дифференциации ее недр.

7. Эпоха раннего – среднего архея (4–3,1 млрд лет назад) характеризовалась зарождением и образованием первой континентальной коры. Островной характер ее формирова-

ния определялся особенностями действовавшей в то время тектоники покрышки (или LID-тектоники). Верхнюю каменную оболочку Земли в это время определяла сплошная мощная кора основного состава, которая наращивалась в результате крупнообъемных излияний основных и ультраосновных расплавов. Основной перенос внутреннего тепла планеты осуществлялся посредством механизма мантийных переворотов, предполагающих апвеллинг перегретых нижнемантийных масс и их перемешивание с остывающей верхней мантией (рис. 2). Располагавшиеся над зонами апвеллинга участки поверхности выделялись наиболее активными вулканическими излияниями и особо мощной корой. Низы такой коры подвергались плавлению под влиянием глубинного тепла, порождая расплавы, которые при дифференциации производили породы тоналит-трондемит-гранодиоритовой серии, участвовавшие в образовании первой сохранившейся континентальной коры.

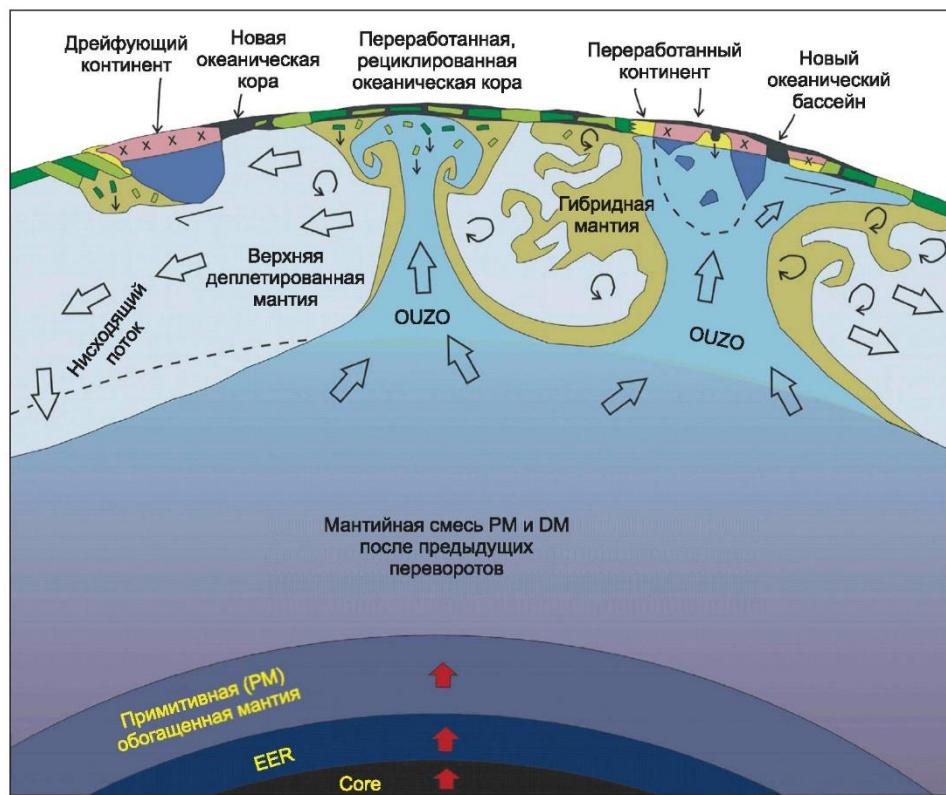


Рис. 2. Модель мантийной динамики в раннем архее (по Bédard, 2018)²
Fig. 2. Model of mantle dynamics in the early Archean (according to Bédard, 2018)²

² Bédard J. H. Stagnant lids and mantle overturns: implications for Archaean tectonics, magma-genesis, crustal growth, mantle evolution, and the start of plate tectonics // Geoscience Frontiers. 2018. Vol. 9. Iss. 1. P. 19–49. <https://doi.org/10.1016/j.gsf.2017.01.005>.



Охлаждение Земли привело к тому, что примерно 3,45 млрд лет назад стало формироваться твердое внутреннее ядро Земли, образующееся при охлаждении жидкого ядра. С этого времени у нашей планеты появилось магнитное поле, защищающее ее поверхность от ионизирующего излучения Солнца. В этот период появились и первые месторождения, в основном месторождения железистых кварцитов, которые формировались в архейских океанах. Позднее стали формироваться первые колчедано-барит-полиметаллические, золоторудные и молибден-порфировые месторождения.

8. Интервал геологической истории между 3,1 и 2 млрд лет назад выделяется как переходный период в истории Земли. С ним связаны изменения целого ряда важнейших характеристик состояния нашей планеты. В этот период начала действовать тектоника малых плит, в результате которой острова первичной континентальной коры стали сбиваться в первые кратоны, а затем и в суперкратоны. Действие субдукционных процессов привело к тому, что в середине переходного периода (2,7–2,5 млрд лет назад) резко усилились про-

цессы корообразования и в это время сформировалось до 27 % объема современной континентальной коры. Эти процессы сопровождались деплитаированием верхней мантии и ее охлаждением (рис. 3), что привело к образованию астеносферы, а также к обогащению коры литофильтральными элементами. В это время резко расширился спектр составов магматических пород. С этого момента в геологических процессах стали формироваться магматические породы известково-щелочной и щелочной серий, изменились условия их распространения – появились вулканические (магматические) пояса и цепи. Субдуцированные слэбы погружались вниз к основанию нижней мантии, охлаждая ее. Между 2,7–2 млрд лет назад слой D" на границе «ядро – мантия» стал достаточно мощным, чтобы влиять на геодинамические процессы.

Вторая половина переходного периода (2,5–2,1 млрд лет назад) охарактеризовалась резким ослаблением геологических процессов, в это время прекратилось межплитное взаимодействие. В обрамлении ранее образованных кратонов и суперкратонов возникли обширные пассивные окраины.

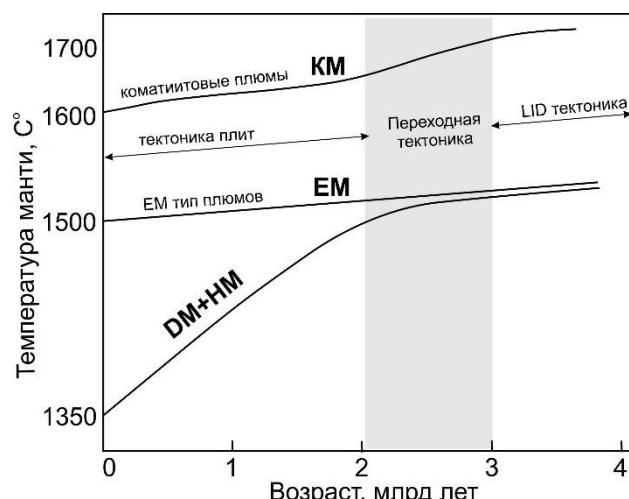


Рис. 3. Изменения температуры мантии, рассчитанные по составам основных петрогенных компонентов океанических базальтов (по Condie et al., 2016)³

Мантийные источники: KM – коматитовый; EM – обогащенный; DM – истощенный; HM – гидратированный.

В конце архея отмечается расхождение температур (термодивергенция)

Fig. 3. Changes in mantle temperature calculated by the compositions of the main petrogenic components of oceanic basalts (according to Condie et al., 2016)³

Mantle sources: KM – komatiite; EM – enriched; DM – depleted; HM – hydrated.

The end of the Archean is characterized by a temperature divergence (thermal divergence)

³ Condie K. C., Aster R. C., van Hunen J. A great thermal divergence in the mantle beginning 2.5 Ga: geochemical constraints from greenstone basalts and komatiites // Geoscience Frontiers. 2016. Vol. 7. Iss. 4. P. 543–553. <https://doi.org/10.1016/j.gsf.2016.01.006>.



Изменения режимов тектонических процессов в переходном периоде сопровождались также изменениями в верхних оболочках Земли – в атмосфере и гидросфере. К середине переходного периода относится так называемая великкая кислородная революция – в атмосфере Земли впервые появился свободный кислород. Этому способствовали разные факторы, прежде всего широкое развитие цианобактерий и активно действовавшие процессы фотолиза. Очищение атмосфера от парниковых газов (в первую очередь от метана) привело к сильному охлаждению поверхности Земли, вследствие которого планета была вовлечена в глобальное Гуронское оледенение.

Смены механизмов взаимодействия земных оболочек сопровождались согласованными изменениями в характере металлогенической продуктивности геологических процессов. В это время сформировались месторождения преимущественно сидерофильных элементов – меди, никеля, хрома, ванадия, кобальта, молибдена, а также благородных металлов, в том числе такие гиганты, как Витватерсrand и Бушвельд.

9. Развитие Земли в поздний период ее геологической истории (< 2 млрд лет) контролировалось процессами глобальной тектоники, включавшей тектонику литосферных плит и тектонику мантийных пломов. Большие литосферные перемещения сопровождались процессами спрединга и субдукции. Благодаря им блоки континентальной коры стали сбиваться в более крупные агломерации, что привело в начале позднего периода к образованию первого суперконтинента Нуна (Колумбия).

Рост континентальной коры происходил за счет аккрецииированного материала в зонах столкновения литосферных плит. При субдукции океанические плиты (слэбы) погружались в мантию в силу пониженной плавучести. Они опускались до границы нижней и верхней мантии и в зависимости от угла наклона либо проникали сквозь эту границу, опускаясь в нижнюю мантию, либо изгибались и следовали вдоль нее, образуя так называемые стагнированные слэбы. Их судьба также завершалась погружением в нижнюю мантию после того,

как они достигали критической массы. В нижней мантии слэбы складировались на границе ядра и мантии, наращивая собой слой D''. Последний, в свою очередь, служил источником мантийных пломов, которые поднимались в верхнюю мантию и к основанию литосферы, где не только подпитывали тепловую конвекцию в астеносфере, но и поставляли мантийное вещество на поверхность Земли.

В пределах Земли зоны нисходящих и восходящих мантийных потоков пространственно разнесены и образуют, соответственно, нисходящие и восходящие ветви общемантийной циркуляции, определяющей основные механизмы теплообмена в пределах нашей планеты (рис. 4). Зоны нисходящих потоков – это конвергентные границы на краях Тихого океана и вдоль Альпийско-Гималайского пояса. Зоны восходящих потоков соотносятся с двумя крупнейшими низкоскоростными мантийными аномалиями: Тихоокеанской, расположенной под южной частью Тихого океана, и Африканской, выделяемой в нижней мантии под Африканской литосферной плитой.

Наличие таких двух центров разнонаправленных движений литосферных и мантийных масс стало причиной того, что перемещение континентов периодически завершалось их объединением в суперконтиненты в той или иной части поверхности Земли. Как правило, эти суперконтиненты появлялись над одним из суперпломов или вблизи него. Перегрев мантии под такой плотной крышей вызывал мантийный апвеллинг и раскол суперконтинентов, фрагменты которых разбегались в разные стороны и снова сталкивались в другой части поверхности Земли, образуя новые группировки. При этом распад одного суперконтинента обычно растягивался во времени и завершался на фоне роста другого. Подобная череда суперконтинентальных циклов стала характерной чертой позднего этапа земной истории. В частности, в настоящее время, по мнению ряда исследователей, происходит формирование очередного суперконтинента Амазия, который должен объединить Африкано-Евразийскую группировку континентов с континентами Северной и Южной Америки и Австралии.

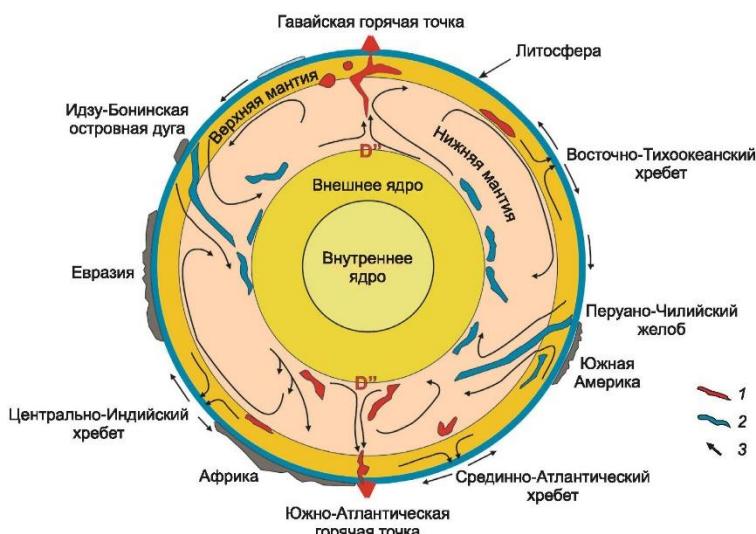


Рис. 4. Разрез Земли с основными элементами тектоники литосферных плит и гипотетическими линиями конвективных мантийных течений

1 – относительно разогретые участки мантии с положительной плавучестью; 2 – относительно холодные участки мантии с отрицательной плавучестью; 3 – направление конвективных потоков (при создании использованы данные электронного ресурса *Files.ethz.ch*⁴)

Fig. 4. Section of the Earth with the main elements of lithospheric plate tectonics and hypothetical lines of convective mantle currents

1 – relatively heated areas of mantle with positive buoyancy; 2 – relatively cold areas of mantle with negative buoyancy; 3 – direction of convective flows (designed based on the data of the electronic resource *Files.ethz.ch*⁴)

Поздний период геологической истории Земли отличается наиболее высокой металлогенической продуктивностью. На активных границах литосферных плит (на континентальных окраинах и в островных дугах, зонах коллизии и на трансформных границах литосферных плит), которые выделяются разнообразным магматизмом, формировались и весьма разнообразные месторождения: вулканические сульфидные месторождения (месторождения типа VHMS (англ.: volcanic-hosted massive sulfide)), медно-молибденовые порфировые, месторождения золота (орогенные, карлин), золото-серебряные и серебряные эпiterмальные, олово-вольфрам-литиевые месторождения и пр. Последовательность их образования отвечала смене типов оруденения от океанических колчеданных и вулканогенных колчеданных месторождений в ассоциации с медно-молибден-порфировыми и эпiterмальными к метаморфогенно-плутоногенным, собственно орогенным, золотым и олово-редкометалльным. Источники рудного вещества в этот период стали суще-

ственno разнообразнее. Они включали не только деплетированную и субдукционно переработанную мантию, но и чрезвычайно разнообразную по составу континентальную кору. Этим объясняется исключительно широкий спектр рудных месторождений, различающихся как по составу рудного вещества, так и по условиям их формирования.

Месторождения внутренних участков литосферных плит в поздний период геологической истории характеризовались своей металлогенией, которой отвечали крупные стратиформные полиметаллические месторождения (типа SEDEX (англ.: sedimentary exhalative), MVT (англ.: Mississippi Valley-type)) и магматические рифтогенные медно-никелевые месторождения. Во внутриплитных условиях формировались, кроме того, многие месторождения редких металлов и месторождения железооксидных медно-золотых руд (месторождения типа IOCG (англ.: iron oxide-copper-gold)), а также железомарганцевые конкреции океанического дна и осадочные месторождения меди и урана.

⁴ Introduction to tectonics // *Files.ethz.ch*. [Электронный ресурс]. URL: <https://www.files.ethz.ch/structuralgeology/JPB/files/English/1Introtecto.pdf> (12.11.2021).



10. Уникальность нашей планеты связана с наличием у нее биосфера, являющейся одной из внешних оболочек планеты и сыгравшей важную роль в ее геологическом развитии. Первые микробные сообщества на Земле появились около 4 млрд лет назад. Вначале они имели ограниченное распространение. К концу архея в этих сообществах появились ацидобактерии, которые продуцировали кислород и сыграли решающую роль в изменении кислотно-основной обстановки на планете. С появлением кислорода Земля лишилась своего метанового «покрыва» и была ввергнута в период глобального Гуронского оледенения (2,4–2,2 млрд лет назад). Кислородная революция имела еще одно важное геологическое последствие – изменились условия минералообразования на Земле. Считается, что без нее было бы невозможно образование не менее двух третей известных видов минералов.

После Гуронского оледенения биологический мир обогатился эукариотами, но затем на протяжении около 1,5 млрд лет разнообразие органического мира менялось незначительно. Около 740 млн лет назад наша планета была ввергнута в жесточайшее оледенение более чем на 150 млн лет. Жизнь в это время сохранилась лишь в отдельных оазисах около выходов глубинного тепла, но после окончания оледенения она быстро распространилась по всей Земле. Экологические ниши были захвачены новыми популяциями организмов, среди которых важную роль стали играть многоклеточные. Наибольшее разнообразие органический мир получил в кембрии, когда заложились тренды в развитии основных групп живых организмов. С этого времени эволюция жизни пошла более быстрыми темпами. На нее влияли меняющиеся условия, к которым организмам приходилось активно приспосабливаться.

Важную роль в эволюционных скачках биосфера сыграли геологические катастрофы, которые вызывали радикальные изменения во внешних оболочках Земли (уничтожение озонаового слоя, кислотные дожди, «ядерные» зимы, закисление вод океанов и т. д.), связанные с вулканизмом крупных изверженных провинций или астероидными ударами. В органи-

ческом мире эти катастрофы вели к глобальным вымираниям, которые завершались исчезновением больших групп организмов. Восстановление органического мира после таких катастроф растягивалось на десятки миллионов лет и сопровождалось сменой лидирующих групп организмов и появлением их представителей, более приспособленных к меняющимся условиям. После позднемеловой катастрофы исчезли динозавры, их место заняли млекопитающие, эволюция которых привела к появлению приматов и их венца – человека.

Особо следует сказать о человеке и его роли в земной истории. Как действующее лицо этой истории человек появился по геологическим меркам совсем недавно. Родиной рода *Homo* была Африка, откуда около 2 млн лет назад он распространился на территории Европы и Азии, освоив различные экологические ниши, что привело к его усилившемуся внутривидовому разнообразию. Человек современного типа сформировался около 30–40 тыс. лет назад. Человеческое общество быстро прогрессировало и к настоящему времени превратилось в реальную геологическую силу, воздействующую на природную среду и климат, а также на процессы, протекающие в земной коре.

Появление цивилизации негативно отразилось на состоянии окружающего мира. Создание определенных типов промышленности (горнодобывающей, химической, металлургической и т. д.) оказало катастрофическое воздействие на среду обитания. Человечество стало геологически активной средой (ноосферой, согласно В. И. Вернадскому), поэтому очень важно, чтобы оно как разумное составляющее геологической истории Земли взяло на себя миссию по сохранения всего живого на нашей планете.

В монографии авторы подняли вопросы геологического развития Земли и показали, что в настоящее время геологическая эволюция нашей планеты сделала все возможное, чтобы человечество могло решать вопросы естественного комфорtnого существования всего органического мира Земли. Книга, несомненно, будет интересна широкому кругу читателей и в первую очередь вузовским преподавателям, которые знакомят студентов с



проблемами современного естествознания и геологических наук, и, разумеется, самим студентам геологических специальностей, которым основные положения монографии и современный альтернативный взгляд на исто-

рию развития нашей планеты позволит существенно расширить кругозор и углубить понимание геологических процессов в их глобальной совокупности.

*Материал подготовили
М. И. Кузьмин, В. В. Ярмоляк*



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;
- минерагения (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 организаций.

4. Статья сопровождается:

- электронными версиями всех документов (скан), в том числе:
авторского заявления, заполненного и подписанного всеми соавторами статьи;
авторского договора;
акта экспертного заключения о возможности открытой публикации материалов;
сведений обо всех авторах на русском и английском языках с указанием названия вуза, организации, учреждения, должности и структурного подразделения, наличия ученой степени, ученого звания, почтового и электронного адресов каждого автора статьи;
- цветными портретными фотографиями авторов на светлом фоне (деловой стиль) в хорошем качестве в формате *.JPEG;

– по желанию автора в статье могут быть указаны его профили в системах цитирования и другие сведения (профили в РИНЦ, ORCID, Scopus, в других системах цитирования, можно предоставить ссылку на личную страницу в Интернете, включая страницы в социальных сетях).

Обращаем Ваше внимание, что вся перечисленная выше информация публикуется в журнале в открытом доступе!

5. Статьи принимаются ответственным секретарем в электронном виде в формате Microsoft Word для Windows по электронной почте nzn@istu.edu. Шрифт – Times New Roman, размер шрифта – 12 (строки через 1 интервал), перенос слов – автоматический. Параметры страницы:



отступы сверху и снизу – 2,5 см, слева и справа – 2 см, абзацный отступ – 0,6 см, ориентация страницы – книжная.

6. Объем текста – от 10000 знаков, включая пробелы, иллюстрационный материал – до 6 рисунков.

7. Статьи должны быть структурированы и выполнены по международному стандарту IMRAD. Структура статьи: индекс УДК, название статьи, фамилия, имя, отчество авторов, название учреждения, где выполнена работа, аннотация и ключевые слова на языке оригинала (русском / китайском / монгольском) и английском языках, введение, цель исследования, материал и методы исследования, результаты исследования и их обсуждение, выводы или заключение, библиографический список и references, критерии авторства, конфликт интересов и сведения об авторах (вся информация предоставляется одним файлом, названным следующим образом: *Фамилия первого автора – Первые три-четыре слова названия.doc*).

8. Рекомендуемая длина названия статьи – до 100 знаков с пробелами. Название статьи должно быть лишено сокращений, аббревиатур, описывать содержание статьи точно и конкретно, при этом оно должно быть достаточно длинным, чтобы однозначно выразить главную идею статьи, и коротким настолько, чтобы ни одно слово нельзя было выбросить без потери смысла.

9. Аннотация должна отражать основную идею статьи, поскольку для большинства читателей она является главным источником информации о представленном исследовании. Объем аннотации – 1500–2000 знаков, примерная структура: цель, методы, предмет, объект и результаты исследования, выводы. Не следует ссылаться на таблицы и / или рисунки, приведенные в основном в тексте статьи, а также использованную литературу, поскольку аннотации также публикуются отдельно от статьи. Не используйте в аннотации сокращения, аббревиатуры, а также формулы, так как аннотации в большинстве баз данных, начиная с РИНЦ, публикуются в формате, исключающем отображение формул.

Ключевые слова должны отражать суть исследования, способствовать работе поисковых систем, по количеству не превышать 10 единиц, словосочетания – не более 3 единиц.

10. Формулы в тексте должны быть набраны в специальном редакторе формул. 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, редакция, 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 ответственному секретарю Храмовских Виталию Александровичу через личный кабинет на сайте www.nznj.ru или по электронной почте 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^b,

Аркадий Евгеньевич Сенченко^c

^{a,c}НИИПИ «Технологии обогащения минерального сырья», г. Иркутск, Россия

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

Автор, ответственный за переписку: Яхно Марина Владиславовна, ymar@istu.edu

Резюме: Цель. Цель данного исследования заключается в изучении технологических типов руд Томинского месторождения меди, а также минерального состава вмещающих пород и руд каждого из трех типов, выявлении минералогических и структурно-текстурных особенностей руд, выявлении взаимосвязи изменения рудной минерализации и степени метаморфизма для каждого типа руд. **Методы.** Рудные тела Томинского медно-порфирового месторождения, залегающие в диоритах и кварцевых диоритах, представляют собой прожилковые и прожилково-вкрапленные скопления в зонах дробления. На месторождении широко развиты метасоматиты кварц-серизитовой формации. Изучение типов руд проводилось с использованием микроскопов. **Результаты.** В результате выделено три геолого-технологических типа руд в пределах Томинского месторождения. Первый тип представлен первичными сульфидными рудами, которые наблюдаются в среднем ниже глубины 50–55 м. По составу это хлорит-мусковит-кварцевые метасоматиты. Вмещающие породы представлены серизитизированными, хлоритизированными и карбонатизированными диоритами. В составе руд преобладают халькопирит и пирит. Практически вся медь содержится в халькопирите. Второй тип – это рудные зоны вторичного сульфидного обогащения. Этот тип сложен первичными и вторичными сульфидами меди. Все породы аргиллизированные и представлены метасоматитами различного состава. Все виды пород несут в себе рудную минерализацию. К третьему типу относятся окисленные руды, которые образуют зону окисления месторождения. Они делятся на три подтипа: глинистые, глинисто-щебнистые и щебнистые руды. Глинистые руды залегают в самых верхних частях коры выветривания, глинисто-щебнистые руды слагают центральную ее часть, а руды в щебнистых образованиях отмечены в нижних горизонтах. Представлено петрографическое описание каждого из типов. Выявлены минералогические и структурно-текстурные особенности руд. В результате изучения петрографического состава каждого типа руд установлена различная степень метаморфизма и вследствие этого – изменение рудной минерализации. **Выводы.** Прослеживается влияние метасоматических процессов, изменивших строение и минеральный состав руд. Для первого типа руды характерно наличие первичных пород – диоритов с насыщенной сульфидной вкрапленностью и с незначительными метасоматическими изменениями. В зоне вторичного обогащения породы претерпели интенсивное метасоматическое изменение. Породы этой зоны насыщены гидроксидами железа. Для зоны интенсивного выветривания характерны глинистые и хлоритизированные породы. Рудная минерализация представлена исключительно окисленными минералами. Сульфиды единичны. Различия в минеральном составе трех типов руд влияют на выбор способов переработки руды в пределах Томинского месторождения.

Ключевые слова: Томинское месторождение, медно-порфировое оруденение, метаморфизм, технологические типы руд

Финансирование:

Благодарности:

Mineralogical and technological types of Tominskoye deposit copper ores (Southern Ural)

Elena M. Kurchevskaya^a, Marina V. Yakhno^b, Arkady Y. Senchenko^c

^{a,c}NIPI TOMS (Scientific Research and Design Institute "Technologies of Minerals Separation"), Irkutsk, Russia

^bIrkutsk National Research Technical University, Irkutsk, Russia

Corresponding author: Marina V. Yakhno, ymar@istu.edu

Abstract. Purpose. The purpose of the article is investigation of the technological types of Tominskoe copper deposit ores; examination of the mineral composition of the host rocks and ores of each of the three types; identification of mineralogical and structural-textural features of ores, research of the relationship of mineralization and metamorphism intensity alteration for each type of ore. **Methods.** Ore bodies of the Tominskoye porphyry copper deposit occurring in the diorites and quartz diorites are veinlet and porphyry-stringer clusters in crush zones. The deposit is characterized with the predominant metasomatic rocks of quartz-sericite formation. **Results.** Three geological and technological ore types are distinguished within the Tominskoye field. The first type is represented by primary sulfide ores, which occur on average lower than 50–55 m depth. By composition they are chlorite-muscovite-quartz metasomatic rocks. The host rocks are represented by sericitized, chloritized and carbonated diorites. Chalcopyrite and pyrite are predominant elements in ore compo-



sition. Chalcopyrite contains carbonated diorites. Chalcopyrite and pyrite are predominant elements in ore composition. Chalcopyrite contains almost all of the copper. The second type includes the ore zones of secondary sulfide concentration. This type is composed of primary and secondary copper sulfides. All the rocks are dirty argillaceous and are represented by metasomatic rocks of different composition. All types of rocks feature ore mineralization. The third type covers oxidized ores, which form the oxidation zone of the deposit. They are divided into three subtypes: clay, claydetrital and detrital ores. Clay ores occur in the uppermost parts of the crust of weathering. Clay-detrital ores compose its central part, while ores in detrital formations have been found in the lower horizons. Each of the type is given a petrographic description. Mineralogical and structural-textural features of ores are identified. The study of the petrographic composition of each type of ores showed a varying degree of metamorphism that resulted in changes in ore mineralization. **Conclusions.** The influence of metasomatic processes is indicated. The last have changed the structure and mineral composition of ores. The presence of primary rocks – diorites with saturated sulfide impregnation and insignificant metasomatic alterations is typical for the first type of ore. The rocks in the zone of secondary concentration have undergone intense metasomatic alteration. These rocks are saturated with iron hydroxides. The presence of clay and chloritized rocks characterize the zone of intense weathering. Ore mineralization is represented exclusively by oxidized minerals. Sulfides are rare. Variations in the mineral composition of the three types of ores influence the choice of ore processing methods at Tominskoye ore deposit.

Keywords: Tominskoye field, porphyry copper mineralization, metamorphism, technological ore types

Funding:

Acknowledgements:

Далее идут **текст статьи** (в виде: введение, цель исследования, материалы и методы исследования, результаты исследования и их обсуждение, заключение), **список источников** (references), **вклад авторов** (contribution of the authors) и **конфликт интересов** (conflict of interests).

Информация об авторах / Information about the authors

Фото
автора

Курчевская Елена Михайловна,
старший научный сотрудник,
НИИПИ «Технологии обогащения минерального сырья»,
г. Иркутск, Россия,
kurchevskaya@tomsgroup.ru,
ORCID.

Elena M. Kurchevskaya,
Senior Researcher,
Scientific Research and Design Institute “Technologies of Minerals Separation”,
Irkutsk, Russia,
kurchevskaya@tomsgroup.ru,
ORCID.

Фото
автора

Яхно Марина Владиславовна,
старший преподаватель кафедры геологии и геохимии полезных ископаемых,
Иркутский национальный исследовательский технический университет,
г. Иркутск, Россия,
umar@istu.edu,
ORCID.

Marina V. Yakhno,
Senior Lecturer of the Department of Geology and Geochemistry of Minerals,
Irkutsk National Research Technical University,
Irkutsk, Russia,
umar@istu.edu,
ORCID.

Фото
автора

Сенченко Аркадий Евгеньевич,
генеральный директор,
НИИПИ «Технологии обогащения минерального сырья»,
г. Иркутск, Россия,
senchenko@tomsgroup.ru,
ORCID.

Arkady E. Senchenko,
CEO,
Scientific Research and Design Institute “Technologies of Minerals Separation”,
Irkutsk, Russia,
senchenko@tomsgroup.ru,
ORCID.

НАУКИ О ЗЕМЛЕ И НЕДРОПОЛЬЗОВАНИЕ

12+

Научный журнал

Том 44 № 4 (77) 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 28.12.2021 г. Формат 60×90/8.
Бумага офсетная. Печать цифровая. Усл. печ. л. 20,5.
Тираж 500 экз. Зак. 198. 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