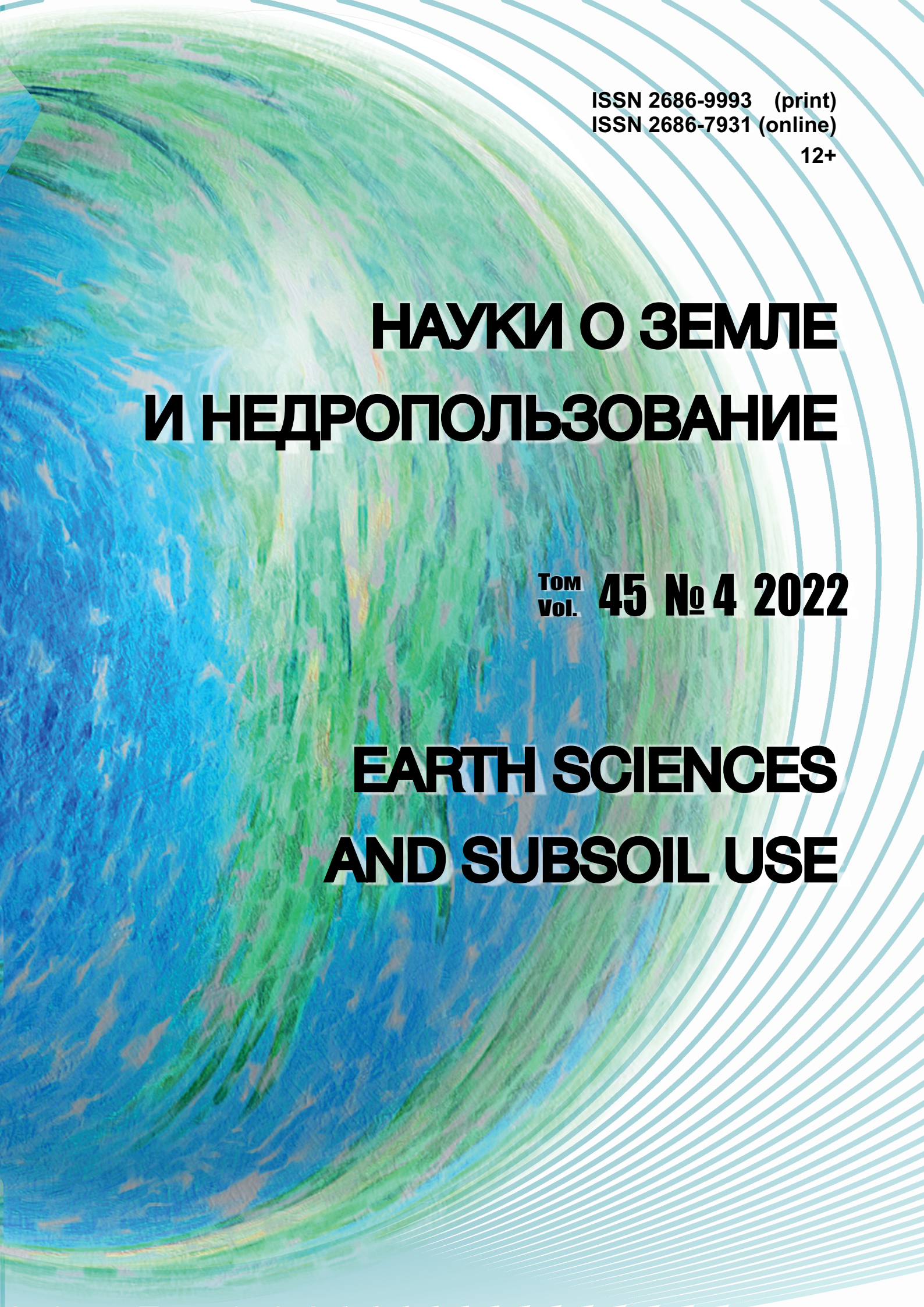




ISSN 2686-9993 (print)
ISSN 2686-7931 (online)
12+

НАУКИ О ЗЕМЛЕ И НЕДРОПОЛЬЗОВАНИЕ

Tom Vol. 45 № 4 2022

EARTH SCIENCES AND SUBSOIL USE

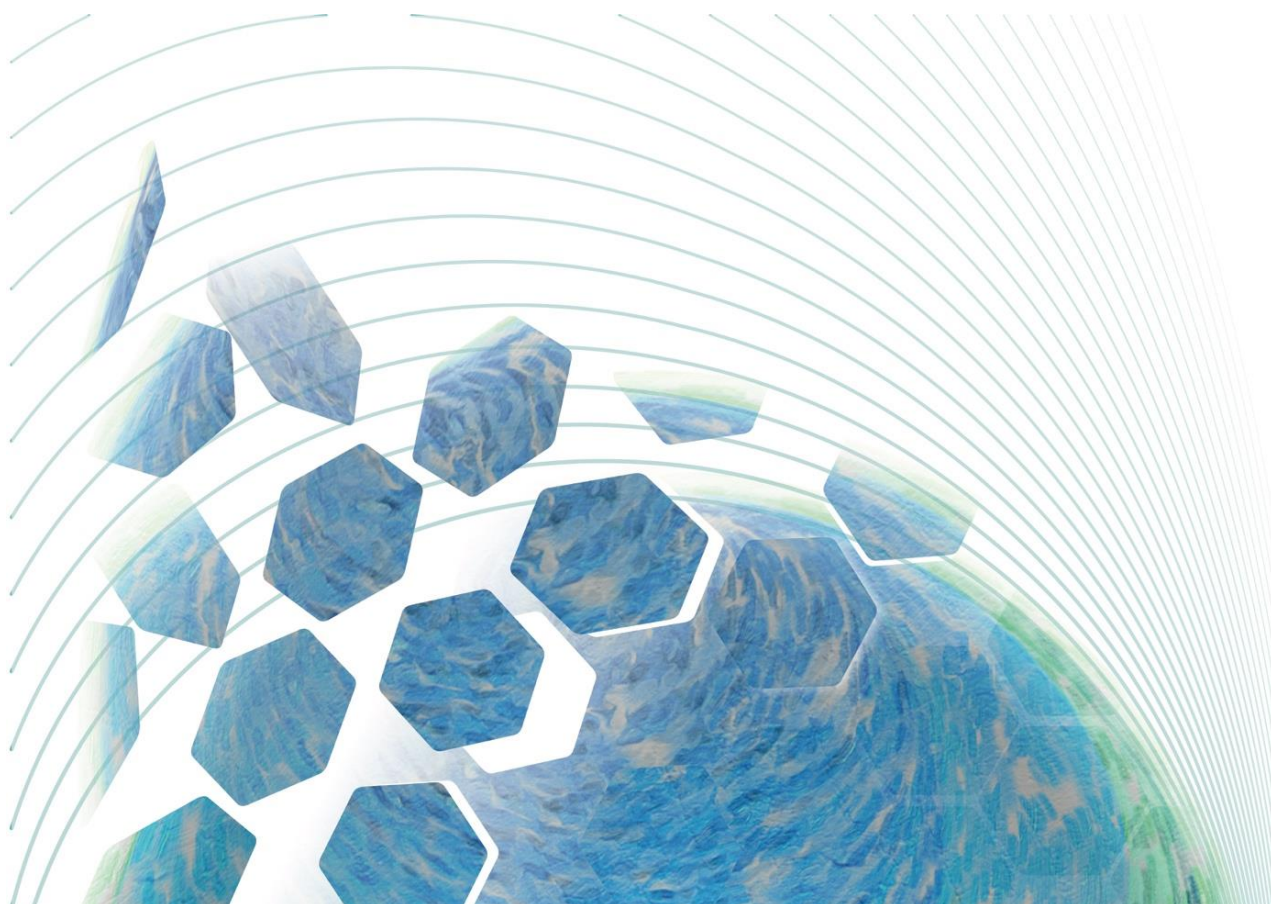
ISSN 2686-9993 (print)
ISSN 2686-7931 (online)

НАУКИ О ЗЕМЛЕ И НЕДРОПОЛЬЗОВАНИЕ

Том
Vol. 45 № 4 2022

EARTH SCIENCES AND SUBSOIL USE

NAUKI O ZEMLE
I NEDROPOL'ZOVANIE



Редакционный совет

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

Председатель редакционного совета:

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

Редакционная коллегия

Главный редактор:

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

Заместитель главного редактора:

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

Ответственный секретарь:

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

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

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

Периодичность выхода – 4 раза в год

Учредитель:

ФГБОУ ВО «Иркутский национальный исследовательский технический университет»

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

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

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

© ФГБОУ ВО «Иркутский национальный
исследовательский технический
университет», 2022

Editorial Council

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

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

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

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

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

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

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

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

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

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

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

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

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

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

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

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

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

Chairman of the Editorial Council

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

Editorial Board

Editor-in-Chief

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

Deputy Editor-in-Chief

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

Executive secretary

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

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

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

Periodicity: 4 times a year

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

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

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

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

© Federal State Budget Educational
Institution of Higher Education
"Irkutsk National Research
Technical University", 2022



СОДЕРЖАНИЕ

Содержание.....	322
-----------------	-----

Геология, поиски и разведка месторождений полезных ископаемых

Цзян Жэньци, Кастанья Дж. П., Цзянь У. Использование сейсмической частоты высокого разрешения и фазовых атрибутов как приемов анализа.....	324
Рапацкая Л. А. Нефтегазоносные комплексы – вещественное выражение геофлюидодинамических систем.....	345
Шелохов И. А., Поспеев А. В., Буддо И. В. Петрофизическое обоснование возможности восстановления упруго-скоростных характеристик геологического разреза на основе данных электромагнитных зондирований.....	367
Коровина О. Ю., Сомин В. А., Айдарханова А. К., Комарова Л. Ф. Содержание искусственных и естественных радионуклидов в донных отложениях водных объектов юго-западной части Алтайского края.....	380

Геоэкология

Гацаева Л. С., Гуня А. Н., Керимов И. А. Геоэкологические последствия излива геотермальной скважины 11-Т Гунюшки на территории Чеченской Республики.....	392
--	-----

Гидрогеология и инженерная геология

Юй Мяо, Павлова Н. А., Дай Чанлэй. Гидротермические условия почвы южного и северного склонов северо-восточного Дасинъаньлиня, Китай.....	408
--	-----

Разведка и разработка месторождений полезных ископаемых

Лысаков Д. В. Разработка долот для направленного бурения в сложных горно-геологических условиях.....	424
--	-----

Обогащение полезных ископаемых

Турецкая Н. Ю., Чикишева Т. А. Обогащение шламов угольных гидроотвалов методом винтовой сепарации.....	436
Прокопьев Е. С., Алексеева О. Л. Оценка возможности вовлечения в переработку углесодержащих отходов шламохранилища Западно-Сибирского металлургического комбината.....	446
Прокопьев С. А. Обзор гравитационных технологий обогащения угольных шламов.....	458
Соловеев Н. П., Болотин Н. М. Применение технологии винтовой сепарации при переработке угольных шламов.....	469
К сведению авторов.....	481



CONTENTS

Contents.....	323
---------------	-----

Geology, Prospecting and Exploration of Mineral Deposits

Jiang Renqi, Castagna J. P., Wu Jian. Applications of high-resolution seismic frequency and phase attribute analysis techniques.....	324
Rapatskaya L. A. Oil and gas complexes as a material expression of geofluid dynamic systems.....	345
Shelokhov I. A., Pospeev A. V., Buddo I. V. Petrophysical substantiation of geological section elastic-velocity property recovery potential based on TEM data.....	367
Korovina O. Yu., Somin V. A., Aidarkhanova A. K., Komarova L. F. The concentrations of artificial and natural radionuclides in the bottom sediments of south-west Altai territory water bodies.....	380

Geoecology

Gatsaeva L. S., Gunya A. N., Kerimov I. A. Geoecological effects of the outflow of 11-T Gunyushki geothermal well in the territory of the Chechen Republic.....	392
---	-----

Hydrogeology and Engineering Geology

Yu Miao, Pavlova N. A., Dai Changlei. Hydrothermal conditions of southern and northern slope soils of northeastern Great Xing'an Mountain, China.....	408
---	-----

Exploration and Development of Mineral Deposits

Lysakov D. V. Development of bits for directional drilling in difficult mining and geological conditions.....	424
---	-----

Mineral Processing

Turetskaya N. Yu., Chikisheva T. A. Enrichment of sludge dump coal by spiral separation.....	436
Prokopiev E. S., Alekseeva O. L. Evaluating the possibility for coal-containing waste of West Siberian Iron-and-Steel Works sludge storage to be involved in processing.....	446
Prokopiev S. A. Overview of coal sludge gravity concentration technologies.....	458
Soloveenko N. P., Bolotin N. M. Application of spiral separation technology in coal sludge processing.....	469
Information for the Authors.....	481

GEOLOGY, PROSPECTING AND EXPLORATION
OF MINERAL DEPOSITS

Original article

<https://doi.org/10.21285/2686-9993-2022-45-4-324-344>Applications of high-resolution seismic frequency
and phase attribute analysis techniquesRenqi Jiang^a, John P. Castagna^b, Jian Wu^c^aBeijing Carrie Oriental Petroleum Technology Company, Beijing, China^aLumina Technologies, Houston, United States of America^bUniversity of Houston, Houston, United States of America^cThe Research Institute of Petroleum Exploration and Development, PetroChina, Beijing, China

Corresponding author: Renqi Jiang, renqi.jiang@carrieenergy.com

Abstract. Seismic prospecting for oil and gas exploration and development is limited by seismic data resolution. Improving the accuracy of quantitative interpretation of seismic data in thin layers, thereby identifying effective reservoirs and delineating favorable areas, can be a key factor for successful exploration and development. Historically, the limit of seismic resolution is usually assumed to be about 1/4 wavelength of the dominant frequency of the data in the formation of interest. Constrained seismic reflectivity inversion can resolve thinner layers than this assumed limit. This leads to a series of high-resolution quantitative interpretation methods and techniques have been developed. Case studies in carbonates, clastic, and unconventional reservoirs indicate that the application of quantitative interpretation techniques such as high-resolution seismic frequency and phase attribute analysis can resolve and allow/or allow quantitative estimation of rock and fluid properties in such seismically thin layers. Band recovery using high resolution seismic processing technology can greatly improve the ability to recognize geological details such as thin layers, faults, and karst caves. Multiscale fault detection technology can effectively detect small-scale faults in addition to more readily recognized large-scale faults. Based on traditional seismic amplitude information, high-resolution spectral decomposition and phase decomposition technology expands seismic attribute analysis to the frequency and phase dimensions, boosting the interpretable geological information content of the seismic data including subsurface geological characteristics and hydrocarbon potential and thereby improving the reliability of seismic interpretation. These technologies, based on high-resolution quantitative interpretation techniques, make the identification of effective reservoirs more efficient and accurate.

Keywords: high-resolution seismic spectral decomposition, phase decomposition, band recovery high resolution enhancement, multi-scale fault detection

Acknowledgements: The editorial board thanks the editors of the Earth Science Frontiers journal for providing the material under the agreement between the editors of the Irkutsk National Research Technical University (Irkutsk, Russia) and the China University of GeoSciences (Beijing, China) on the exchange of open access scientific articles.

For citation: Jiang Renqi, Castagna J. P., Wu Jian. Applications of high-resolution seismic frequency and phase attribute analysis techniques. *Nauki o Zemle i nedropol'zovanie = Earth sciences and subsoil use*. 2022;45(4):324-344. <https://doi.org/10.21285/2686-9993-2022-45-4-324-344>.

ГЕОЛОГИЯ, ПОИСКИ И РАЗВЕДКА
МЕСТОРОЖДЕНИЙ ПОЛЕЗНЫХ ИСКОПАЕМЫХ

Научная статья

УДК 550.8.05

Использование сейсмической частоты высокого разрешения
и фазовых атрибутов как приемов анализаЖэньци Цзянь^a, Джон П. Кастанья^b, Цзянь У^c^aКомпания «Биджинг Кари Ориентал Петролеум Технолоджи», Пекин, Китай^aКомпания «Люмина Технолоджиз», Хьюстон, Соединенные Штаты Америки^bХьюстонский университет, Хьюстон, Соединенные Штаты Америки^cНаучно-исследовательский институт разведки и добычи углеводородов, Петрожайна, Пекин, Китай

Автор, ответственный за переписку: Цзянь Жэньци, renqi.jiang@carrieenergy.com

© Jiang Renqi, Castagna J. P., Wu Jian, 2022



Резюме. Сейсмические исследования для разведки и разработки месторождений нефти и газа ограничены разрешающей способностью сейсмических данных. В данном случае ключевым фактором успешной разведки и разработки месторождений может стать повышение точности количественной интерпретации сейсмических данных в маломощных пластах, позволяющее выявить эффективные резервуары и обозначить благоприятные участки. Исторически сложилось так, что предел сейсмического разрешения обычно считается равным примерно $1/4$ длины волны доминирующей частоты данных в интересующем пласте. С помощью ограниченной инверсии сейсмической отражательной способности можно распознать более тонкие слои, чем этот предполагаемый предел, что привело к разработке ряда методов и приемов высокоразрешающей количественной интерпретации. Предметные исследования карбонатных, обломочных и нетрадиционных залежей показывают, что применение методов количественной интерпретации, таких как сейсмический высокоразрешающий частотный анализ и анализ фазовых атрибутов, позволяет распознать и разрешить количественную оценку свойств горных пород и флюидов в таких сейсмически тонких слоях. Восстановление диапазона частот с использованием технологии высокоразрешающей обработки сейсмических данных может значительно улучшить способность распознавания таких геологических деталей, как тонкие слои, разломы и карстовые пещеры. Технология многомасштабного обнаружения разломов может эффективно выявлять мелкие разломы наряду с более легко распознаваемыми крупномасштабными разрывами. Технология высокоразрешающего спектрального разложения и фазового разложения, основанная на традиционной информации о сейсмической амплитуде, расширяет сейсмический атрибутный анализ до размера частоты и фазы, чем расширяет содержание интерпретируемой геологической информации о сейсмических данных, включая геологические характеристики и потенциал углеводородов, и тем самым повышает надежность сейсмической интерпретации. Эти технологии, основанные на методах количественной интерпретации с высоким разрешением, позволяют более эффективно и точно обнаруживать продуктивные коллекторы.

Ключевые слова: высокоразрешающее сейсмическое спектральное разложение, фазовое разложение, восстанавливающий диапазон частот усиление высокого разрешения, многомасштабное обнаружение разломов

Благодарности: Редколлегия благодарит редакцию журнала Earth Science Frontiers за предоставление материала 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.

Для цитирования: Цзян Жэньци, Кастанья Дж. П., Цзянь У. Использование сейсмической частоты высокого разрешения и фазовых атрибутов как приемов анализа // Науки о Земле и недропользование. 2022. Т. 45. № 4. С. 324–344. <https://doi.org/10.21285/2686-9993-2022-45-4-324-344>.

Introduction

Quantitative seismic interpretation utilizes the characteristics of reflected seismic waves to infer geological features and rock/fluid properties of subsurface strata [1–3]. In the field of petroleum exploration and development, two issues are particularly important: first, the resolution of seismic data does not always meet exploration and development needs; second, the incompleteness and complexity of information in seismic signals lead to a strong ambiguity of scales of geological interpretation based on seismic attributes.

Resolution of seismic data. As exploration and development of petroleum fields and basins mature and has entered the stage of detailed and refined exploration and development, especially after the oil and gas fields have entered the middle and late stages of development, the requirements for the vertical identification, delineation and exploitation of stratigraphic units are increasing, the need to make geological inferences for seismically thin reservoirs or flow units (individual sand formations, reefs, highly permeable

carbonate formations, etc.) has increased. Many individual sand formations around 10 m or even thinner in China have become the main reservoir interval for development. However, due to the $1/4$ wavelength limitation of conventional seismic data it is typical to be able to resolve only layers of several tens of meters, which may not meet the requirements of oil and gas field production.

There are two commons to improve the vertical resolution of seismic data: one is to perform high-resolution acquisition using equipment and geometries to maximize high frequency signal, and the other is to digitally process the seismic data in such a way as to maximize the breadth of the spectral bandwidth. High-resolution seismic acquisition not only increases the cost and time greatly, but also suffers from physical limitations that may prevent the acquisition of the required frequency content. Therefore, the development of theories and methods to improve the resolution processing of conventional seismic data has become a subject of research among geophysicists [4, 5].



A variety of methods to improve seismic resolution have been, including various processing of seismic signals and compensation of high-frequency signals using well data [e.g., 6]. However, there is an obvious problem with all these methods at present, namely the fidelity of the processing results. Does the extra reflected wave after processing have a geological meaning? Does it correspond to the wave impedance contrast of the stratum interface? Are the vertical and lateral variations of seismic reflections a true indication of the stratigraphy? If the processing results in distortion of the seismic signal, it will not only not help geological research, but also lead to wrong interpretation and judgment, and reduce the success rate of drilling. Therefore, how to improve the resolution with high fidelity and thus truly enhance the thin layer identification is the biggest challenge to improve seismic resolution processing technology.

In a blocky earth impedance structure, the simple assumption of sparsity of reflection coefficient pairs at layer boundaries can be used to extend the seismic bandwidth and improve seismic resolution [4, 5] based on the characteristics of the reflection coefficient spectrum of stratigraphic reflection coefficient pairs with periodic oscillations in the frequency domain. When the assumption of a sparse number of layers realistically captures the true reflectivity series, this can significantly improve the resolution of seismic data with good fidelity, and has been verified in numerous oil and gas production applications [e.g., 4, 5, 7].

Non-uniqueness of seismic reflection wave properties. Even with perfect noise-free data, an infinite number of earth models can result in the same band-limited reflection seismogram. The use of various attributes of seismic reflection waves to study the geological characteristics of subsurface reservoirs has been the main content of geological research in oil and gas fields. However, the complexity of the subsurface geological situation leads to numerous factors affecting the seismic attributes, and the seismic data acquisition and processing also affect the attributes of seismic reflection waves, so there are indeed many solutions to the inversion problem and uncertainty of inverted impedance has been a great factor limiting the work of predicting reservoir characteristics using seismic attribute parameters,

especially below seismic tuning. It is the goal of many geophysicists to mine seismic attributes from seismic reflection waves that are less poly synthetic and more closely and directly related to the geological characteristics of reservoirs, to carry out more in-depth, specific and accurate prediction of subsurface oil reservoirs. Practical applications show that increasing the dimensionality of seismic attributes is a very effective method. Ultimately, prior information is required to constrain the possible solutions, and how this information is employed has a great influence on the resolution of the inversion result. As discussed in [5, 7], there are a few common means of employing a priori information (1) using a starting earth impedance model, (2) assuming a sparse number of reflection-coefficients, and (3) qualifying the inversion objective function in terms of deviation from prior assumptions such as rock physics relationships etc. Method (1) necessarily biases the inversion result greatly towards pre-conceived

Seismic reflections have three basic attributes: amplitude, frequency, and phase. Spectral decomposition provides the time-localized frequency dependence of amplitude and phase. If we decompose the seismic reflection waves according to different frequencies or phases, analyze the distribution characteristics and differences of reflection energy (amplitude) at different frequencies or phases, and find out the “characteristic frequency” or “characteristic phase”, it is possible to reduce the multiplicity of seismic properties. This reduction can result in improved visualization of geological features.

The research and prediction of reservoir properties through the distribution characteristics and rules of seismic wave propagation in the frequency and phase domains increases the dimensionality of the analysis of seismic attributes. This does not increase the information content of the seismic data, but rather subsets it in different ways, to make specific information more apparent and interpretable.

To analyze the reflected energy of seismic reflection waves in different “domains” (frequency or phase domains) from a multidimensional perspective, and to identify the characteristic frequencies or phases of different geological units, special algorithms are needed to decompose the



seismic reflection wave signals with high resolution and high fidelity, so that the information contained in the original seismic signals can be revealed. Constrained-least squares spectral analysis [8] and subsequent phase decomposition [9] makes the multidimensional information content more interpretable in terms of rock and fluid characteristics.

Technical approach

Spectrum recovery technology to improve resolution. Conventional understanding of seismic resolution is largely based on the Widess model [10] and deconvolution theory based on the Fourier convolution theorem. Over 60 years ago, Widess [10] calculated synthetic seismograms for a thinning wedge layer with exactly equal and opposite reflection coefficients encased in two-half spaces. Generalizations from this model are unfortunately highly misleading, as it is a unique case where the even part of the reflectivity series is exactly zero. For the more general case of a non-zero even part, as the layer thins, the even part becomes more significant while the odd part tends to cancel. According to the Widess model, below $1/8^{\text{th}}$ of a wavelength (λ), for all practical purposes, only the amplitude of the composite waveform changes with thickness following a tuning curve, but the peak/trough time separation, and therefore the dominant frequency of the reflection is almost invariant. More specifically, the dominant frequency for a Widess thin-layer approaches that of the derivative of the seismic wavelet as thickness goes to zero. This means that it is impossible to determine whether an amplitude change of a thin layer well below tuning is due to a time-thickness change for the layer or a change in layer impedance. In inversion for a thin layer with exactly equal and opposite

reflection coefficients, layer thickness and impedance will trade off and in the presence of even a small amount of noise inversion will be unstable. Many conventional inversion algorithms thus are designed to not even attempt to invert for very thin layers. Again, as a practical matter, in the presence of noise, and as side-lobe interference effects may further confuse the signal, the actual limit of seismic resolution is often considered to be $\lambda/4$ [3, 10].

But Tirado [3] in 2004, modeling a more realistic wedge model derived from a sonic log, found that, contrary to the Widess model, the dominant frequency decreased systematically as the layer thickness thinned below $\lambda/8$; when the layer thickness is less than a certain thickness (tuning frequency turning point), the main frequency starts to decrease and coincides with the main frequency of the wavelet (rather than the derivative of the main frequency of the wavelet) at a layer thickness of 0. This conclusion is just the opposite of Widess's predicted conclusion for thin layers.

Puryear and Castagna [4] argued that in practice, the reflection coefficients at the upper and lower stratigraphic interfaces are not typically the same as in the Widess model, but more of a laminar distribution with different impedance of the upper and lower media, which can be decomposed into an "odd" reflection coefficient pair and an "even" reflection coefficient pair (Fig. 1). The Widess model is a special, which means that the resolution limit of the Widess model is not limited as long as the "even" reflection coefficient pair is not zero. As the variation in dominant frequency is a continuous quantity, this means that layer thicknesses that are even smaller than the sampling interval of the seismic signal can theoretically be predicted.

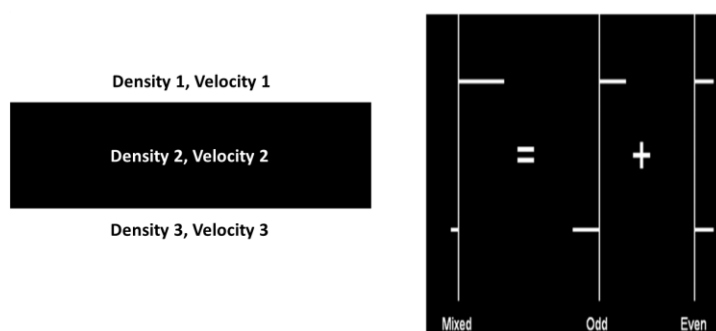


Fig. 1. Strata model and its reflectivity (modified after [4])

Рис. 1. Модель пластов и ее отражательная способность (согласно источнику [4] с изменениями)



According to odd/even analysis, the variation characteristics of peak amplitude and frequency of odd and even reflection coefficient pairs with layer thickness are represented separately (Fig. 2). The total reflection response is a combination of odd and even responses. Note that below $\lambda/8$, for this particular case there is a 5 Hz change in peak frequency at thickness for which the Widess model (odd part) suggests that the waveform frequency will not change appreciably. As an even reflection coefficient pair is, by definition, zero-phase, one can see that if there is any even part to the reflectivity series, the thin layer response should go to zero phase as the thickness approaches zero, rather than 90° phase as predicted by the Widess model.

The spectral recovery resolution enhancement technique uses reflection coefficient pairs, rather than a single reflection-coefficients, to represent stratigraphic units, which can achieve improved detail identification and lateral stability. Sparse-spike inversion finds the reflection coefficient series that minimizes the sum of the reflection coefficient magnitudes while also reproducing the data. This has the effect of minimizing the time thickness of odd reflection coefficient pairs, as the smallest pair will occur at the greatest layer thickness. Parameterizing the inversion differently [e.g., 7] one can minimize, for example, the number of reflection coefficient pairs summing to form the reflectivity series. We refer to this approach as sparse layer inversion. Note that with this approach, there is no built-in bias against thin layers in the inversion objective function. Unlike traditional sparse spike inversion, sparse layer inversion uses the sparsity of layers

as a constraint, unlike sparse spike inversion which is sensitive only to thick strata and ignores thin layers. According to the generalized reflection coefficient model, both the odd and even parts of a stratigraphic reflection coefficient decomposition can be considered as a pair of reflection coefficients (spikes) of equal magnitude at top and base of a layer. When sinusoidal of different frequencies and such a pair of spikes are convolved, some frequencies constructively interfere while others destructively interfere, and periodic peaks and troughs appear in the frequency domain (Fig. 3). The periodicity in the frequency domain (quefrequency) is only related to the thickness of the reflection coefficient pair. Based on the fact that the distance between the peak and the trough on the frequency spectrum is a deterministic function of the thickness of the formation, a new algorithm for reflection coefficient inversion in the frequency domain using a summation of constant periodic values can be derived. The coefficients of the real part of the complex spectrum are exactly equal to the even part of the generic reflection coefficient model, and the coefficients of the imaginary part are equal to the odd part of the reflection coefficient model. Using this property, a simultaneous coupling of the odd and even parts of the thin-layer reflection record can be optimally fitted to obtain the thin-layer thickness and the odd and even reflection coefficients. For the multilayer case, a matrix equation system consisting of several sequences of thin-layer even part, odd part, and thickness is formed, and the spectrum of the stratigraphic reflection coefficients can be obtained by inversion solution of the simultaneous search-and-fit [5, 7, 8].

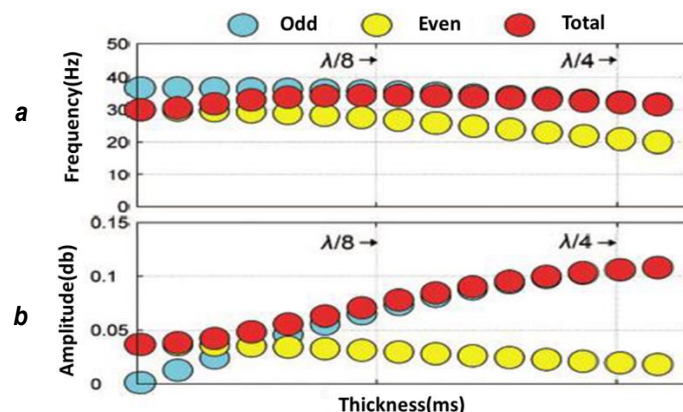


Fig. 2. Peak frequency and peak amplitude vs. thickness variation (modified after [4])
Рис. 2. Зависимость пиковой частоты и пиковой амплитуды от изменения толщины
(согласно источнику [4] с изменениями)

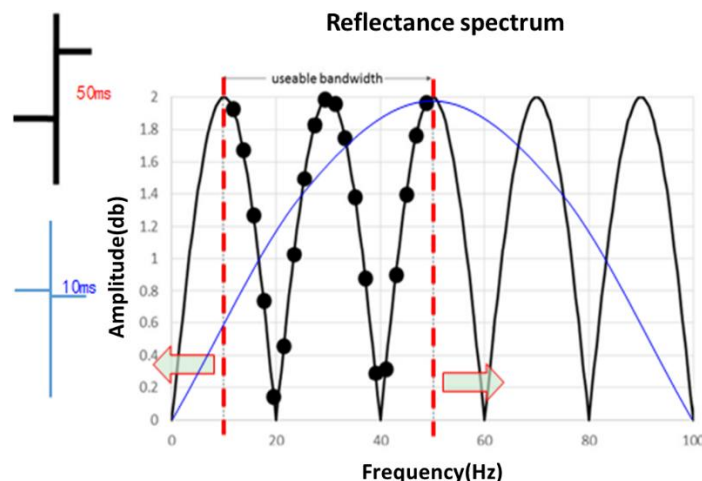


Fig. 3. Schema of band recovery high resolution processing (modified after [5])
Рис. 3. Схема высокоразрешающей обработки восстановления диапазона частот (согласно источнику [5] с изменениями)

Traditional spectral analysis based on the Fourier Transform suffers loss of temporal and frequency resolution due to windowing the data. In essence, the Fourier Transform yields the spectrum of the windowed data. Similarly, resolution of Wavelet Transform spectral analysis is controlled by the resolution of the analyzing wavelets and suffers from the Heisenberg Uncertainty Principle which states that the product of temporal and frequency resolution for any given wavelet dictionary is a constant; one must always pay the price of reduced resolution in one domain, when attempting to increase resolution in the other domain. A sparse wavelet approach can be applied to the problem of spectral decomposition and improve frequency resolution without degrading time resolution [6]. The result is an estimate of the spectrum of the data within the window, rather than the spectrum of the windowed data. This provides high-resolution spectral decomposition which improves sparse-layer inversion and thus spectrum recovery; recovering and using the high-frequency information of the data from the original seismic data, thereby making an overcoming the defects of the Fourier transform, so that the seismic resolution after sparse-layer inversion breaks through the seismic resolution of the traditional Widess model. Unlike deconvolution, which at any frequency boosts the noise the same amount as the signal at the frequency, this approach benefits from the S/N ratio of the main band of the seismic data, and thereby boosts the signal more than the noise on the spectral tail at high frequency. The seismic resolution can reach

1/8 to 1/16 of the original seismic signal wavelength [4]. Its resolution, fidelity and reliability are significantly advanced and improved compared with the previous techniques, and it has unique advantages for the interpretation and identification of thin reservoirs.

High resolution spectrum decomposition technology. Due to the sensitivity of amplitude variation with frequency, different geological objects have different response characteristics in different frequency bands. More detail, more definite, and more localized reflection attributes and identification can be obtained in different frequency bands. Therefore, through spectrum decomposition, the frequencies that best convey the information of interest can be preferentially selected, and the characteristics of reservoirs can be interpreted and studied more clearly and accurately. In the past two decades, the spectrum decomposition technique has been widely used in fine geological interpretation, however, traditional seismic spectrum decomposition has limited resolution in either the time or frequency domains [3, 8], and the temporal resolution and frequency resolution cannot be maximized at the same time, so a method optimized for seismic interpretation purposes is needed.

This spectral decomposition technique is implemented by the constrained least squares complex spectral decomposition (CLSSA) method [8]. Compared to other methods (Fig. 4), the CLSSA method is a high-resolution spectral decomposition method with high temporal and frequency resolution at the same time. Performed as an

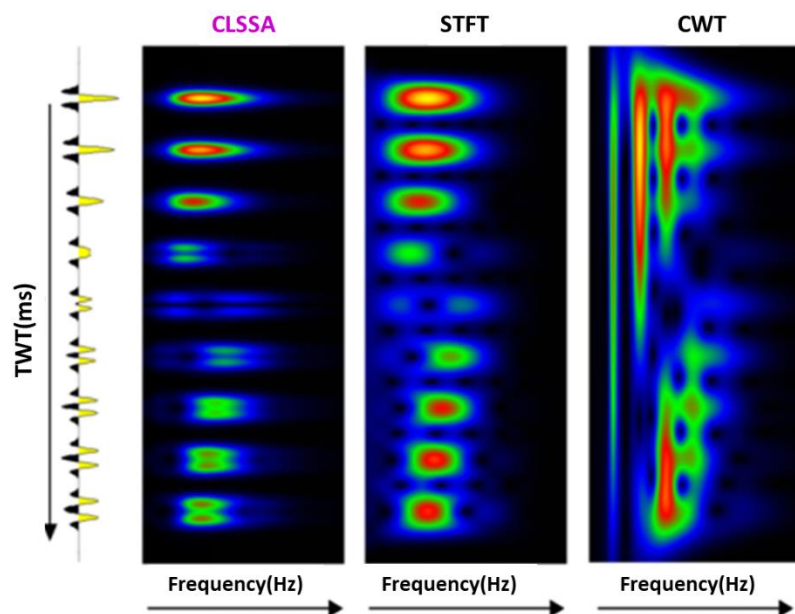


Fig. 4. CLSSA (Constrained Least Squares Complex Spectral Decomposition), STFT (Short-time Fourier Transform) and CWT (Continuous Wavelet Transform) spectral decomposition of a seismic trace (modified after [8])

Рис. 4. Спектральное разложение сейсмической трассы CLSSA (комплексное спектральное разложение методом наименьших квадратов с ограничениями), STFT (кратковременное преобразование Фурье) и CWT (непрерывное вейвлет-преобразование) (согласно источнику [8] с изменениями)

inversion process, it is possible to fit the broadband output results to the input data as a superposition of wavelet dictionary atoms. This process uses temporally and spatially varying wavelets, which is important for large data sets with spatial wavelet variations, so that the output spectrum is stable (in a statistical sense) in time and space.

Spectral decomposition using the least squares method (CLSSA) has unique advantages. For a given time window, it reduces the temporal and spectral smoothing effect of the window in contrast to the discrete Fourier transform. The reduced spectral smoothing ensures better identification of the reflection spectral properties within the short-time window. The temporal resolution is equal to the resolution of the data, rather than that of the window. The degree of frequency resolution improvement of the CLSSA method relative to the short-time Fourier transform increases with the reduction of the time window length. In addition, the CLSSA method substantially improves the temporal resolution, especially at low frequencies, compared to the continuous wavelet transform which utilizes long low-frequency wavelets. Therefore, the least-squares method for spectral decomposition is superior to both the short-time Fourier transform and the continuous subwave transform.

The CLSSA output has the temporal resolution of the seismic data itself, without being limited by the temporal resolution of the window or the analyzed wavelets, while maintaining the necessary frequency resolution. This technique enables a variety of previously unattainable application ideas, including finer stratigraphic and structural imaging, detection and quantification of fractures and faults, expansion of the bandwidth of seismic data, and more accurate reservoir prediction or direct detection of hydrocarbons.

Phase decomposition technique. Phase decomposition [9] is a new and unique application. Seismic impedance anomalies caused by pore fluids as well as lithological variations are often difficult to observe using conventional seismic profiles as they are masked by other lithological impedance variations unrelated to hydrocarbons or reservoir rock. However, impedance variations in seismically thin layers can result in more distinctive amplitude variations in the different phase components of the seismic response. By decomposing the seismic traces into different phase components while suppressing the unwanted phase components, subtle features can sometimes be more clearly identified. For example, a weak seismic reflection amplitude anomaly response caused by hydrocarbon changes, lithology changes, or sedimentary unit changes may



show significant amplitude on a desired phase component. Using this technique, a completely different but more accurate map of the extent of the thin reservoir and its location can sometimes be generated.

Different from the instantaneous phase attribute which conveys no reflection strength information and phase rotation which does not change the amplitude envelope of events, seismic phase decomposition is a new technique to study subsurface geological targets by expanding seismic trace amplitudes in the phase domain on the basis of high-resolution time-frequency analysis to obtain the energy distribution of seismic reflections related to phase only, and then analyze the energy changes in the phase domain for different geological features and differences in lithology and physical properties.

By spectral decomposition, seismic trace amplitude can be decomposed into a three-dimensional function of amplitude versus frequency and phase. A seismic trace is a one-dimensional function of amplitude with time $S(t)$. The amplitude spectrum is a two-dimensional function $A(f, t)$ of amplitude with time and frequency, and the phase spectrum is a two-dimensional function $\theta(f, t)$ of phase with time and frequency. If we form the amplitude spectrum and phase spectrum as a function $A(f, t) \cdot \cos[\theta(f, t)]$, then the two-dimensional function representing the reflection amplitude as a function of phase and time can be obtained

by the following equation:

$$S'(\theta, t) = \int_{f_1}^{f_2} A(f, t) \cos \theta(f, t) df,$$

where f_1 and f_2 are the start and cutoff frequencies of a selected frequency band. We refer to this function as the phase channel set. Any desired phase component in the specified frequency band is extracted by the following equation:

$$S'(t) = \int_{\theta_1}^{\theta_2} S'(\theta, t) d\theta,$$

where θ_1 and θ_2 are the onset and cutoff phases of the phase interval. In this way, the seismic reflection homogeneous axis with specific spectral characteristics can be suppressed or enhanced. The process of decomposing seismic traces into a two-dimensional function of amplitude with time and phase is called phase decomposition (Fig. 5).

The change in amplitude for a specific phase with time is called the phase component. It is possible to amplify the seismic reflection energy changes caused by small impedance changes in strata below the tuned thickness, making specific geological features more easily detectable. Any pair of reflection coefficients can be expressed as a sum of the odd and even components [3, 11, 12]. Even-component reflection coefficients have the same magnitude and sign, and odd-component reflection coefficients have the same magnitude and opposite sign [3, 12]. In an isolated thin layer, the change in impedance changes the odd component of the reflectivity and thus the phase

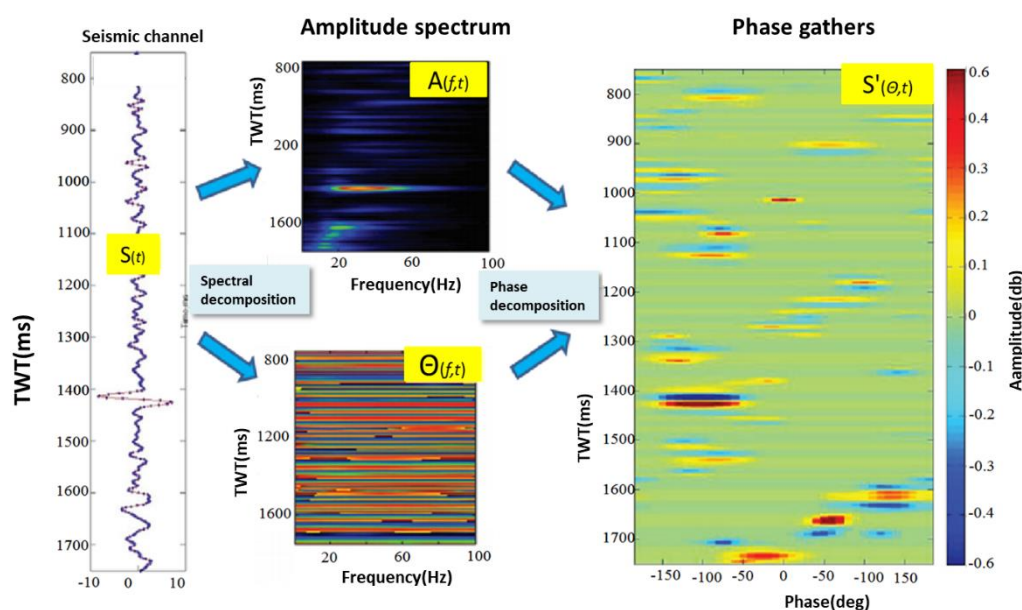


Fig. 5. Schema of phase decomposition of a seismic trace
Рис. 5. Схема фазового разложения сейсмической трассы



of the local reflectivity, while the even component remains almost constant. When the phase of seismic data is filtered according to the above method, the odd component of the phase may exhibit a stronger apparent amplitude anomaly at the location of the original amplitude. In particular, in the case of low-impedance thin-layered gas-bearing sandstones (bright spots), the amplitude anomalies corresponding to the gas saturation will appear in the -90° phase component if the seismic wavelet is zero phase. Therefore, the reconstruction of specific phase bands of the superimposed data can be used as a means of hydrocarbon detection or physical prediction of seismic thin layers.

As an example, Figure 6, *a* shows the top and bottom interface reflection coefficient pairs of a formation without oil and gas, and the seismic response, with 0° and -90° phase components. Figure 6, *b* shows that the top and bottom interface reflection coefficient pairs of the formation are slightly changed after containing oil and gas, with the top interface reflection coefficient becoming smaller and the bottom interface reflection coefficient becoming larger. However, because the impedance difference is small, the seismic

response is almost the same as that without oil and gas. After the phase decomposition, it can be found that the seismic response of the 0° phase component is almost the same as that of the formation without oil and gas; while the seismic response of the -90° phase component is significantly amplified.

When the seismic impedance anomalies caused by pore fluid and lithological changes are not obvious, the energy distribution on different phase components may be significantly different. The phase decomposition technique originally decomposes each seismic trace into different phase components, and by analyzing the seismic reflection energy on different phase components, some subtle anomalous responses caused by pore fluid (containing oil and gas) changes and lithology changes can possibly be identified. The phase decomposition technique can decompose and reconstruct the seismic traces to extract the most sensitive part of the seismic signal for oil and gas response, so that the weak anomalies caused by reservoir physical changes or oil and gas-bearing can be more apparent and improve the accuracy of oil and gas prediction.

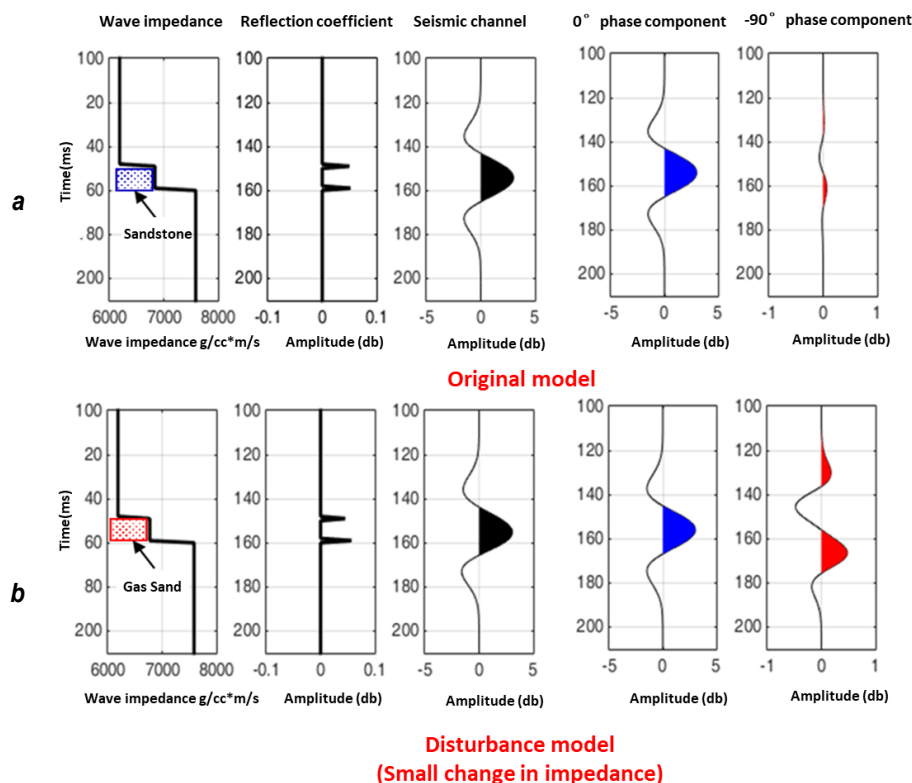


Fig. 6. Schema of phase decomposition of a seismic trace:

a – original model, *b* – disturbance model

Рис. 6. Схема фазового разложения сейсмической трассы:

a – исходная модель, *b* – модель отклонений



Multi-scale fault detection (FaultDetect) technology. The accurate interpretation of fault systems, especially the identification and interpretation of complex fault systems, hidden faults and small faults, etc., has been a difficult problem in geological studies of oil and gas reservoirs. Currently, fault detection techniques commonly use geometric attributes such as coherence, dip, azimuth and curvature [13–17]. Since the coherence technique was proposed, it has been a hot topic in interpretation techniques and has been very helpful for fault interpretation [18–20].

However, these common fault detection techniques are used to determine the distribution of the spatial continuity of seismic attributes by calculating the similarity of adjacent seismic traces. The calculation results are all affected by the calculation time window and dominant frequency of the seismic data, which makes the calculated fault location deviate from the actual fault location in the plane, resulting in the detected fault location being somewhat erroneous on a time slice.

Large-scale faults with large fault displacement can be identified using conventional techniques such as coherence and curvature attributes on conventional seismic data, but high-angle faults or tiny faults with insignificant displacement are difficult to be accurately identified and described on conventional seismic profiles [21, 23]. New fault detection and processing techniques are needed to accurately identify the location of breakpoints of tiny faults, so that the spatial continuity and extension of the section can be displayed more clearly and accurately.

In the frequency domain, the seismic response of different geological features in the subsurface has the most obvious response at different characteristic frequencies. It is the trend of seismic exploration technology development to extend the traditional seismic imaging and interpretation work in the time domain to the frequency domain.

Similar to the principle of focused imaging, there are significant differences in the accuracy and clarity of different scales of faults reflected in different frequency bands of seismic signals [23–27]. In imaging and interpreting the temporal thickness and geological discontinuities of 3D seismic data, the corresponding most sensitive

attributes of seismic response imaging in different frequency bands can be analyzed in the frequency domain by high-resolution time-frequency analysis, and the faults can be finely imaged by the changes of seismic information in different frequency bands. The seismic phase discontinuity caused by the vertical displacement of a fault is most obvious when the seismic record time change from traces on either side of the fault is equal to a half-period of the dominant frequency of the seismic data. As a corollary, the phase discontinuity caused by a fault of any throw, is maximized at the spectral decomposition frequency corresponding to a vertical displacement in seismic record time of a half-period of that frequency. In this way, high resolution spectral and phase decomposition can be used to find the frequency at which maximum phase and amplitude discontinuity will occur for any fault. Various seismic discontinuity measures as a function of frequency can be thus combined to form an optimized discontinuity attribute.

Specific implementation process: First, the 3D seismic data set is decomposed into a high-resolution time-localized complex spectrum to generate a series of single-frequency data sets, and the amplitude and phase data sets of the corresponding multiple frequencies are obtained. Then, edge enhancement is performed on the amplitude and phase data sets of different frequencies, and the fault detection attribute data sets reflecting different scales are obtained by identifying various preferred discontinuity attributes such as waveform, amplitude and phase at different frequencies. These data are then combined using adaptive principal component analysis to form the final comprehensive fault detection attribute. This is readily followed by automatic fault tracking and identification.

The frequency-domain multiscale fault detection (FaultDetect) technology has the following features: (1) Starting from the frequency domain, it can realize the identification of weak seismic response discontinuities, provide more accurate fracture information, and improve the interpretability of the fault grid system; (2) The identification results have a very high vertical resolution, and the fault location and fault displacement can be accurately carved in 3D. The frequency-domain multidimensional multiscale fault detection tech-



nique is particularly useful for strike slip faults with small vertical displacement, which are difficult to be recognized by human eyes. Geological variations across the fault, however, may produce subtle seismic character changes which are detected by this algorithm.

The biggest technical advantage of frequency-domain multiscale fault detection (Fault-Detect) technology is that it adds a variety of discontinuity attribute information in the frequency domain, so that the discontinuity in seismic reflection can be reflected and described more accurately and clearly. It can map the complex multiscale fault network and produces geological meaningful vertical and lateral slices through the 3D fault attribute volume. It consequently has higher resolution and reliability than traditional fault identification methods such as coherence and curvature, and is thus a true three-dimensional fault detection technology. Compared with other fault detection methods, the frequency domain fracture detection technique detects fault breaks with higher accuracy and has stronger recognition ability for shear faults, high-angle faults and micro faults (Fig. 7).

Application examples

Application examples in the Tarim Basin. The Tarim Basin is a hydrocarbon-rich basin with many types of hydrocarbon reservoirs. Among them, carbonate reservoirs are mainly of cave and fracture types; how to accurately describe the caved and fractured reservoir system and

predict the hydrocarbon-bearing formations is the key for accurate exploration and development. In contrast, clastic reservoirs are characterized by large changes in reservoir properties, and it is a major challenge to conduct detail reservoir studies for oil and gas-bearing reservoirs. A number of studies have been carried out in the Tarim Basin using the above-mentioned new techniques, all of which have achieved good results.

The reservoir unit in the target area of marine carbonate in Tarim Basin is dominated by the cave system controlled by the fault and fracture system, especially as caverns often form highly productive oil and gas reservoirs. However, due to the complex surface conditions, coupled with the large burial depth of the target layer and serious absorption and attenuation, it leads to the low original dominant frequency of the target layer of seismic data, weak high-frequency signals, and inconspicuous imaging of caves and small fractures, resulting in certain difficulties in the accurate identification and interpretation of cave systems. Therefore, it is necessary to improve the resolution of seismic data through reliable and effective means to obtain a high-resolution seismic dataset and improve the recognition and interpretation capability of seismic data in faulted systems and karst (cave) type reservoirs.

Firstly, in response to the problems of low resolution of the original seismic data, unclear breakpoints on the profile, and difficult interpretation of the faults (Fig. 8, a), the resolution enhancement processing was carried out by using the spectrum

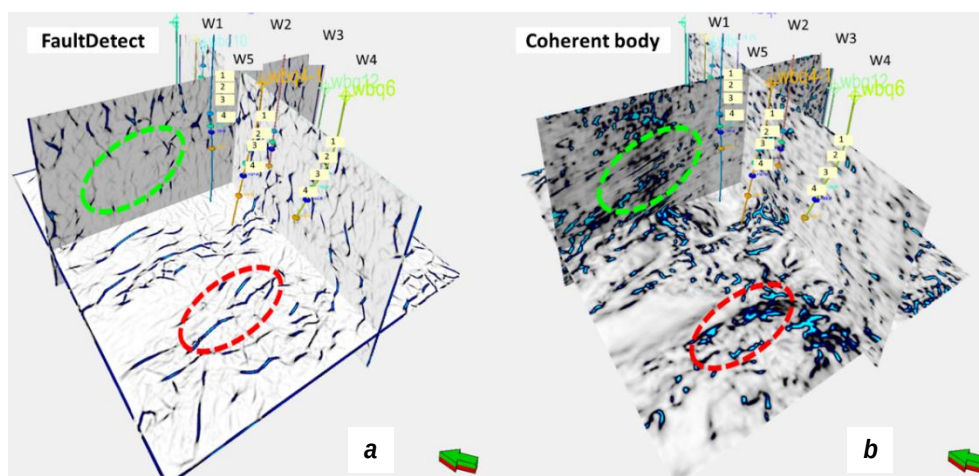


Fig. 7. 3D views of Faultdetect and Coherence volumes:

a – multi-scale fracture detection body 3D result map; b – coherent body fracture detection 3D result map

Рис. 7. Трехмерные изображения томов Faultdetect и Coherence:

а – многомасштабная 3D-карта результатов обнаружения разломов тела; б – трехмерная карта результатов когерентного обнаружения разломов тела

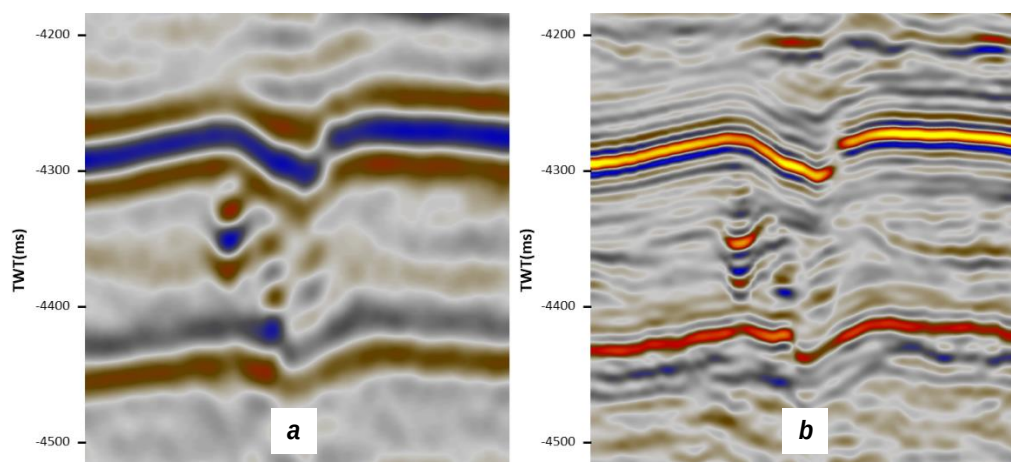


Fig. 8. Seismic sections before and after high resolution processing:

a – conventional seismic profile; b – seismic profile after improved resolution processing

Рис. 8. Сейсмические участки до и после высокоразрешающей обработки:

a – условный сейсмический профиль; b – сейсмический профиль после улучшенной высокоразрешающей обработки

recovery to improve the seismic resolution processing technique, and the main frequency of the processed seismic data was greatly improved, and the bandwidth became wider. At the same time, the fault boundary information was highlighted and the ability to identify faults was effectively enhanced (Fig. 8, b).

Due to the low resolution of the original seismic data, the imaging of the caves on the profile is not clear and difficult to interpret the display. After improving the resolution processing, the main frequency of seismic data is increased and the bandwidth becomes wider. At the same time, the boundary of the cave is more accurately imaged, the recognition ability is obviously enhanced, and the multiphase cave is well reflected.

The oil and gas reservoir in an area of Tarim Basin is a cave type reservoir, and the spatial distribution of the cave reservoir is mainly controlled by faults, and the accurate identification and interpretation of the fault system is the key to the design of the exploration and development plan of the reservoir. However, due to the multi-period tectonic movements, the fault system is very complex, and multiple phases and multiple sets of faults are developed, making the accurate interpretation of the fault system one of the main challenges in the geological research of the area.

The 3D seismic data in this area have undergone several re-processing and interpretations, but due to the limitations of previous research methods, they basically can only satisfy the interpretation of the main fault, and it is difficult to

meet the requirements of interpretation of small micro-faults within the main fault and fine description of faults [21]. To address this problem, the seismic data in the area were processed and systematically interpreted using frequency-domain multiscale fault detection. Comparing the coherent and frequency-domain multiscale fault detection data profiles (Fig. 9), the coherence dataset contains some footprints and linear interference along the layer affecting the fault identification, while the frequency-domain multiscale fault detection dataset strengthens the discontinuity of seismic data while removing footprints and linear interference along the layer, and the predicted results have clear fault plans, good continuity, and good matching relationship with the caved reservoir.

At the same time, the multiscale fault detection with a variety of sensitive seismic attributes in the frequency and phase domains can provide a clearer picture of the common “fault-solution” system in the west part. As shown in Fig. 10, the color in the figure represents the caved reservoir, and the black color represents the development and distribution of different scale of faults.

Some carbonate caved type oil and gas reservoir development areas have been discovered in Tarim Basin, but drilled wells have found that the oil and gas properties of different cave bodies in the same area vary greatly, and there are both highly productive oil and gas producing wells and water only producing wells. How to use seismic data to identify oil-bearing cave and

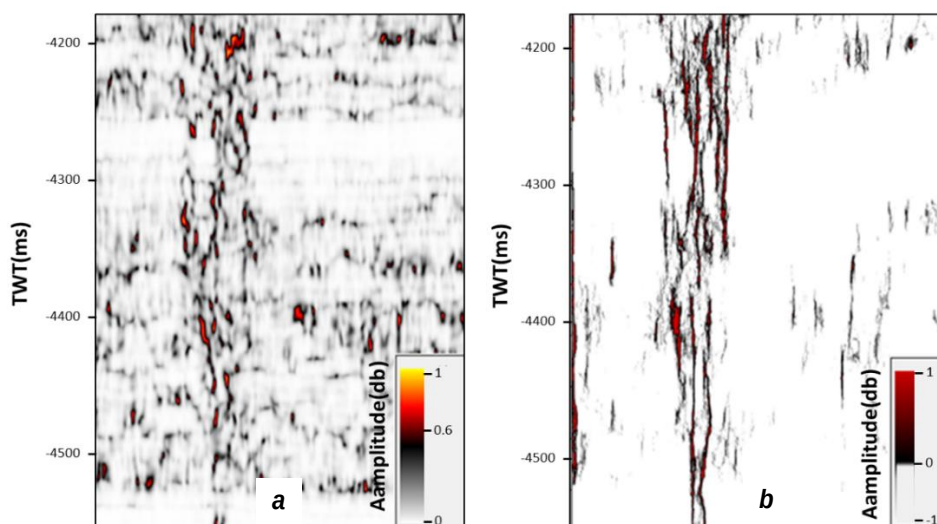


Fig. 9. Sections of Coherence and FaultDetect:

a – coherent body profile; b – multi-scale fracture detection body profile

Рис. 9. Участки в Coherence и FaultDetect:

a – целостный профиль тела; b – многомасштабный профиль тела для обнаружения разломов

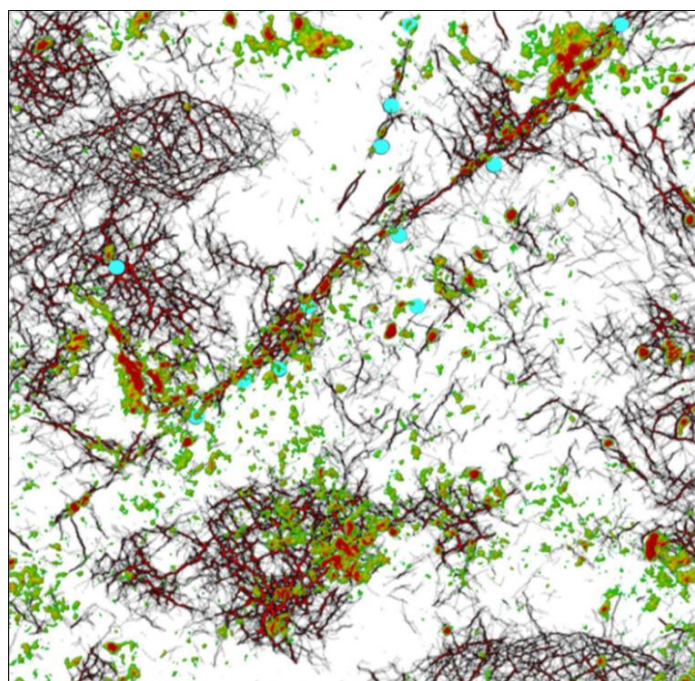


Fig. 10. Slice of Faultdetect overlay on Amplitude attribute (delineate caves)

Рис. 10. Фрагмент наложения Faultdetect на атрибут Amplitude (обозначение полостей)

improve the exploration success rate is one of the main tasks of geological research on cave-type oil and gas reservoirs.

Due to the large burial depth of caved oil and gas reservoirs in the Tarim Basin, the seismic signal absorption and attenuation are severe, resulting in low original primary frequency of the target layer of seismic data. Conventional seismic attribute analysis techniques and frequency absorption and attenuation techniques are difficult to achieve satisfactory results. In the conventional

frequency absorption and attenuation attributes, both oil-bearing beads and water-bearing beads show strong absorption and attenuation characteristics (Fig. 11, a, b). To address this problem, research work on the detection of oil-bearing gas properties in caves was conducted using the above-mentioned phase decomposition technique. The results show that the oil- and water-bearing caved targets can be accurately distinguished on the -90° phase dataset profile after phase decomposition (Fig. 11, c).

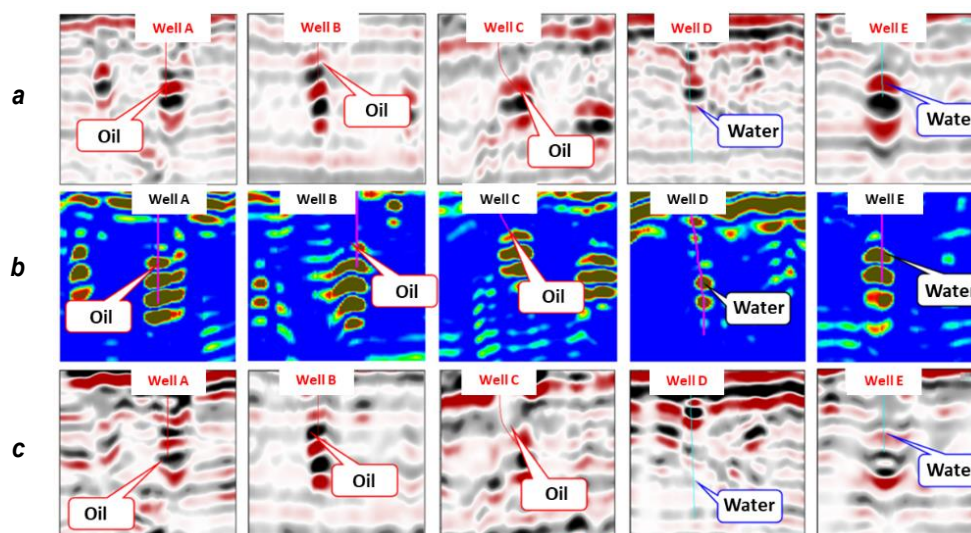


Fig. 11. Sections of raw seismic (top), frequency absorption decay (middle) and -90° phase component (bottom):
a – original seismic profile; b – frequency absorption attenuation profile; c – -90° phase component body comparison profile

Рис. 11. Участки исходных сейсмических данных (вверху), затухания частотного поглощения (в центре) и фазовой составляющей -90° (внизу):

a – исходный сейсмический профиль; b – частотный профиль затухания поглощения;
c – профиль сравнения фазового компонента тела -90°

The reservoir of the Kepingtag Formation of the Silurian System in an area on the north slope of the Tarim Basin is a clastic reservoir with wide lateral variation in reservoir properties. In order to improve the development effect and optimize the development well deployment, the lateral variation of reservoir properties needs to be finely delineated. However, due to the large burial depth of the target layer, which is below 5,000 m on average, and the poor reservoir properties, thin thickness of the target layer, and small difference in wave impedance between the reservoir and non-reservoir, coupled with the low resolution of conventional seismic data, reliable reservoir prediction cannot be performed using conventional techniques. In response to the demand of development and production in this area, the spectrum recovery resolution enhancement technique was used for processing, and the resolution of the processed seismic data was significantly improved (Fig. 12). The overlay before and after resolution enhancement of seismic lines over SS9 well shows the profile (variable density is shown before processing, variable area is shown after processing, and well curve is GR), and the Paleozoic clastic reservoir can be clearly reflected at the target layer lateral variation.

It can be seen from the seismic profiles before and after improving the resolution of the main survey line over SS9 well: the geological features of

reservoir thickness gradually thinning laterally are completely not reflected in the conventional seismic data, but are more clearly reflected in the high-resolution problem, and the seismic data have effectively improved the vertical and lateral resolution of the thin layer.

Fan delta identification in a North American block. The main producing layer of a North American block, the P formation, is a sedimentary unit compounded by multiple submerged fan deltas with complex reservoir lateral variations. Previous studies have confirmed that this reservoir is mainly a lithological reservoir controlled by lithological pinchout, and the reservoir is a fan delta sedimentary sand body. Several wells have been drilled in the main hydrocarbon-bearing objective, and although the wells drilled in different structural areas have similar trap conditions and have found reservoir sands, the hydrocarbon-bearing properties vary greatly. Some of the wells are highly productive, while others are mainly dry, resulting in a low drilling success rate. Previous research work has also been done, especially reservoir prediction studies using various seismic inversion techniques, hoping to accurately identify different reservoir units and predict the reservoir properties of different fan bodies, but all failed to solve the problem well.

Since different fans were formed at different times and under different depositional environ-

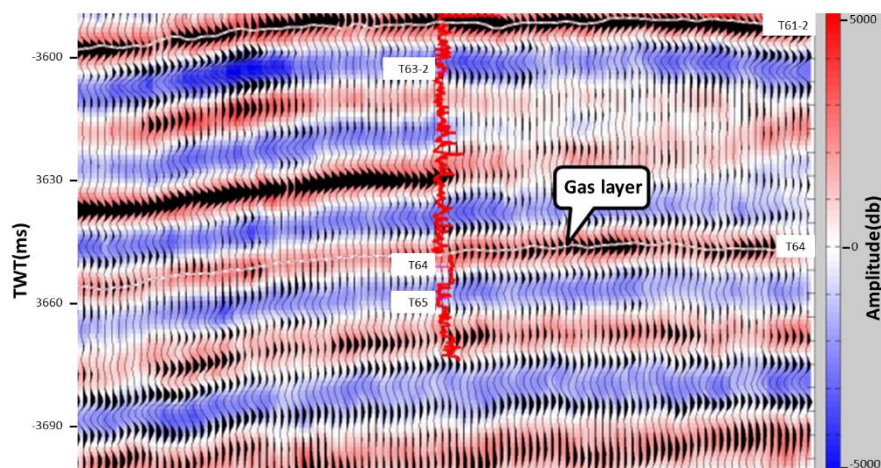


Fig. 12. Seismic sections of high-resolution processing (wiggle) overlay on raw (color)

Variable area is shown for conventional profiles, variable density is shown for profiles after resolution enhancement processing; well log is gamma-ray

Рис. 12. Сейсмические участки наложения обработанных с высоким разрешением данных (синусоидные колебания) на необработанные (цветные)

Переменная площадь показана для обычных профилей, переменная плотность показана для профилей после улучшенной обработки с высоким разрешением; каротажная кривая дана в гамма-излучении

ments, their rock components, lithological assemblage characteristics, monolayer thickness, and sand-mud interstratification frequencies are different. And the frequency attributes in the seismic signal are most sensitive to this difference in response. Therefore, we can start from the frequency domain of the seismic signal to identify and classify different fans more accurately.

On the RMS amplitude map picked up along the top surface of the P-layer on the original full-band seismic data (Fig. 13, a), multiple strong amplitude zones representing sandstone development areas can be observed. In the strong amplitude zones, although the amplitude intensity varies, the overall distribution is contiguous, which is interpreted as a reservoir distribution feature with multiple stacked fans lateral distribution. However, this amplitude feature is difficult to distinguish different fans, and it is impossible to accurately identify the fans with favorable reservoir development and their boundaries. Using CLSSA high-resolution spectral decomposition technique, the original seismic data is decomposed into multiple single frequency datasets and the amplitude map is extracted separately for each single frequency. Different geological units can be clearly identified in the RMS amplitude maps of different single-frequency along the layers. In the 10 Hz single-frequency along-layer RMS amplitude map (Fig. 13, b) multiple sub-merged fans are identified separately and are

more clearly shown. Rather, on the 20 Hz and 30 Hz single-frequency along-layer RMS amplitude maps (Fig. 13, c, d) the delta plain channel and delta plain deposits are more clearly reflected. This result improves a strong support for optimizing the well deployment plan and improving the drilling success rate.

Identification of gas-bearing properties of tight sandstone gas reservoirs in Ordos Basin. Ordos Basin is one of the important hydrocarbon-bearing basins in China, and the main reservoir is tight sandstone, which is difficult and risky to explore and develop. Due to the large variation of lateral properties, uneven gas abundance, and complex gas-water relationship, seismic data is needed to identify and predict productive areas to reasonably deploy development wells. However, due to the high hardness of the reservoir skeleton in the area and the weak difference in seismic response between the gas formation and the surrounding rocks, studies have been conducted several times using conventional oil and gas identification techniques, but the results are not obvious.

To accurately identify gas-productive areas, phase decomposition was applied. As shown in Figure 14, conventional seismic amplitudes did not distinguish gas from wet wells (Fig. 14, a, b), while amplitudes on the -90° phase component clearly do so (Fig. 14, c, d). These results were eventually verified from gas logging and actual well test results.

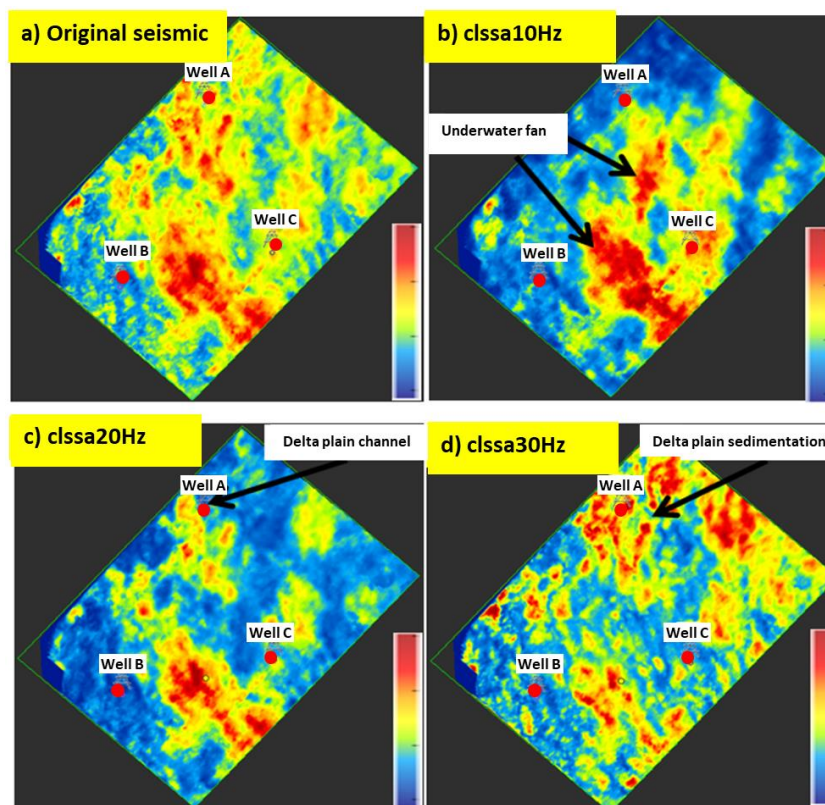


Fig. 13. Slices of root-mean-square amplitude on P layer in iso-frequency volumes
Рис. 13. Срезы среднеквадратичной амплитуды на слое P в изочастотных объемах

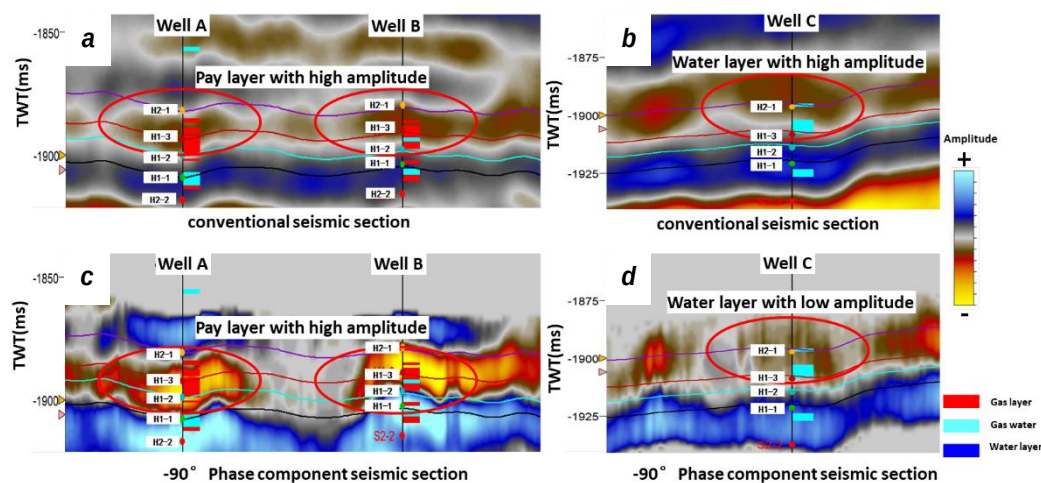


Fig. 14. Sections of raw seismic and -90° phase component:

a – over well A and B conventional seismic profile; b – over well C conventional seismic profile;
c – over well A and B -90° phase profile; d – over well C -90° phase profile

Рис. 14. Участки необработанных сейсмических данных и фазового компонента -90°:

a – условный сейсмический профиль по скважинам A и B; b – условный сейсмический профиль по скважине C;
c – фазовый профиль -90° по скважинам A и B; d – фазовый профиль -90° по скважине C

Bohai Bay faulted lacustrine shale oil prediction. Bohai Bay basin is a Cenozoic terrestrial faulted lacustrine basin developed in a regional extensional context, in which the shale oil exploration and development has achieved a major breakthrough with high and stable production from lacustrine shale for the first time in China.

The studied area has 7 oil-rich layers, which can be further divided into 21 small layers with a single layer thickness of 10~30 m. Since horizontal well development requires a more accurate understanding of each oil-rich single layer, the existing seismic data resolution is difficult to achieve direct identification and interpretation of indivi-



dual layers, which makes it difficult to trace the precise desired path of horizontal wells. Therefore, it is necessary to reasonably improve the resolution of seismic data, clarify the lithological sweet spot distribution, and ensure that the designed horizontal section passes through the sweet spot layer to achieve single well production enhancement and stable production.

According to the log characteristics of the shale oil reservoir, the sweet spot section of the target layer is mainly characterized by low impedance. The seismic data were processed with improved resolution by applying the spectrum recovery improved resolution technique, so that each oil-rich thin layer has a corresponding reflector. As shown by extracting the well-side seismic traces at well Z, the impedance prediction results from improved resolution processing correspond well with the logged reservoir, and the vertical and lateral impedance characteristics of the layer and the thickness variation of the individual layers can be clearly identified (Fig. 15).

Conclusion

Throughout the history of global reservoir exploration and development, every breakthrough and development is associated with the development and application of new technologies. Seis-

mic data is one of the most important foundations in geological research of oil and gas exploration and development, and the development and breakthrough of seismic data processing technology will certainly greatly improve the success of oil and gas exploration and development.

Spectrum recovery high-resolution processing technology has dramatically improved the ability of seismic data to identify stratigraphic units, making it possible to directly identify and study individual reservoir layers. The multiscale fault detection technology (FaultDetect) makes some small faults and complex fault systems that are difficult to interpret more clearly reflected, and improves the reliability of structure interpretation. Spectral decomposition and phase decomposition techniques have improved the dimensionality of seismic attribute studies and brought new perspectives and means for reservoir studies and hydrocarbon properties prediction.

From several application examples mentioned above, it can be seen that the application of new technologies has further refined and rationalized the reservoir research based on seismic data. Whether it is for reservoir thickness below the tuning thickness, which cannot be identified and interpreted by conventional seismic methods, or for the fine description of complex

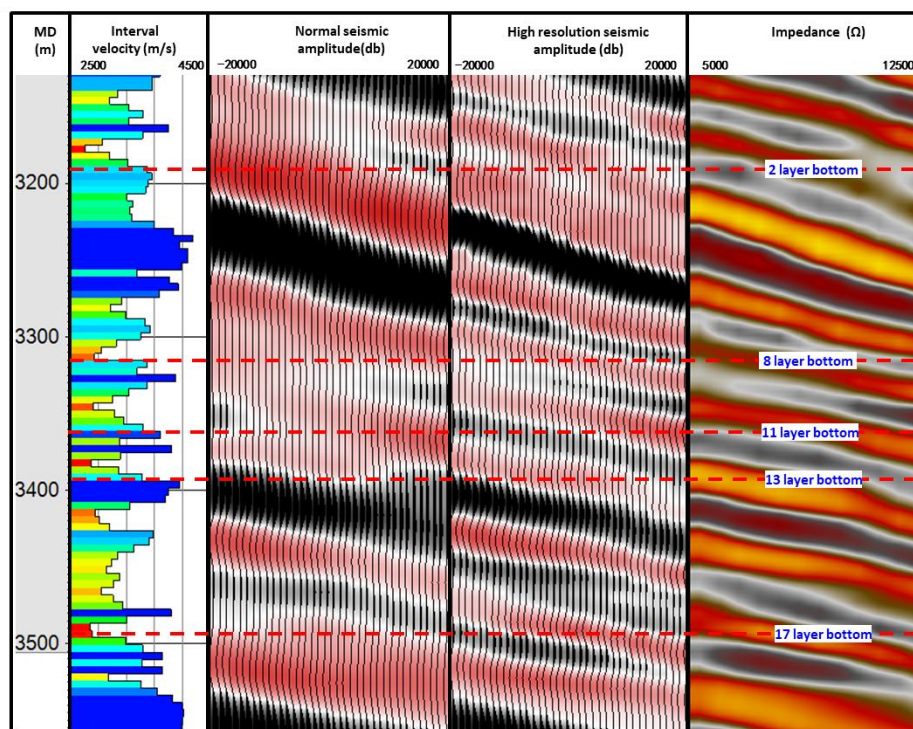


Fig. 15. Seismic sections before and after high-resolution processing
Рис. 15. Сейсмические участки до и после высокочастотной обработки



reservoirs, as well as a variety of geological and geophysical difficulties such as unconventional hydrocarbon enrichment segment carving, the use of high-resolution special processing technology and analysis from multiple dimensions of amplitude, frequency and phase will be a very cost-effective solution.

The quality of seismic data has a great influence on these methods, especially the signal-to-noise ratio and fidelity of seismic data. In the current conventional seismic processing work, some frequency lifting methods are often used to broaden the bandwidth of seismic data, but because these methods often have poor fidelity, the correspondence between seismic signals and subsurface

geological units is changed and destroyed, which leads to unreasonable and reliable results when the new techniques in this paper are used for processing. Therefore, fidelity in conventional seismic processing should receive more attention.

The techniques presented in this paper have been successfully applied in many oil and gas regions around the world, and have helped to improve the exploration success rate and optimize the development plan. With the continuous development and promotion of these and other new technologies, it will effectively promote the oil and gas exploration and development work in the direction of more detailed, deeper and more efficient progress.

References

1. Du S. T. Seismic attribute analysis. *Petroleum Geophysics*. 2004;2(4):12-16.
2. Lu G. H., Yu C. Q., Dong N. The application of post-stack seismic attribute analysis in the oil-gas exploration and development. *Progress in Geophysics*. 2006;21(1):161-166.
3. Castagna J. P. Recent advances in seismic lithologic analysis. *Geophysics*. 2001;66(1):42-46. <https://doi.org/10.1190/1.1444918>.
4. Puryear C. I., Castagna J. P. Layer-thickness determination and stratigraphic interpretation using spectral inversion: theory and application. *Geophysics*. 2008;73(2):37-48. <https://doi.org/10.1190/1.2838274>.
5. Liang C., Castagna J. P., Torres R. Z. Tutorial: spectral bandwidth extension – invention versus harmonic extrapolation. *Geophysics*. 2017;82(4):1JA-Z33. <https://doi.org/10.1190/geo2015-0572.1>.
6. Castagna J. P., Sun J., Siegfried R. W. Instantaneous spectral analysis: detection of low frequency shadows associated with hydrocarbons. *The Leading Edge*. 2003;22(2):120-127. <https://doi.org/10.1190/1.1559038>.
7. Zhang R., Castagna J. P. Seismic sparse-layer reflectivity inversion using basis pursuit decomposition. *Geophysics*. 2011;76(6):147-158. <https://doi.org/10.1190/geo2011-0103.1>.
8. Castagna J. P. Comparison of spectral decomposition methods. *First Break*. 2006;24(3):75-79. <https://doi.org/10.3997/1365-2397.24.1093.26885>.
9. Castagna J. P., Oyem A., Portniaguine O., Aikulola U. Phase decomposition. *Interpretation*. 2016;4(3):SN1. <https://doi.org/10.1190/INT-2015-0150.1>.
10. Widess M. B. How thin is a thin bed. *Geophysics*. 1973;38(6):1176-1180. <https://doi.org/10.1190/1.1440403>.
11. Chopra S., Castagna J. P., Portniaguine O. Seismic resolution and thin-bed reflectivity inversion. *CSEG Recorder*. 2006;11(2):19-25.
12. Mora D., Castagna J. P., Meza R., Chen S., Jiang R. Case study: seismic resolution and reservoir characterization of thin sands using multiattribute analysis and bandwidth extension in the Daqing field, China. *Interpretation*. 2020;8(1):1F-T215. <https://doi.org/10.1190/INT-2019-0017.1>.
13. Duan Y. X., Cao J., Sun Q. F. Application of auto-adaptive dip-steering technique to fault recognition. *Lithologic Reservoirs*. 2017;29(4):101-107. <https://doi.org/10.3969/j.issn.1673-8926.2017.04.012>.
14. Tian T., Xia T. X., Yan T., et al. Application of formation dip in the fine description of fault: take A oilfield in Bohai bay basin as an example. *Progress in Geophysics*. 2017;32(5):2236-2240.
15. Xu D. K., Wang Y. Y., Zheng J. F. Dip steering coherent-enhancing filtering and its application on seismic data of complex fault-block. *Progress in Geophysics*. 2016;31(3):1224-1228. <https://doi.org/10.6038/pg20160340>.
16. Yin C., Du X. D., Zhao R. M., et al. Dip steered structure oriented filter and its application. *Progress in Geophysics*. 2014;29(6):2818-2822.
17. Yin X. Y., Gao J. H., Zong Z. Y. Curvature attribute based on dip scan with eccentric window. *Chinese Journal of Geophysics*. 2014;57(10):3411-3412.
18. Wang J., Wang R. Fault identification method based on variance-coherence cubes. *Chinese Journal of Engineering Geophysics*. 2016;13(1):46-51. <https://doi.org/10.3969/j.issn.1672-7940.2016.01.008>.
19. Li T. T., Hou S. Y., Ma S. Z., Li D. L. Overview and research progress of fault identification method. *Progress in Geophysics*. 2018;33(4):1507-1514. <https://doi.org/10.6038/pg2018BB0311>.
20. Huang C., Li P. F., Wang T. Y., et al. The application of seismic attribute analysis technology to the identification of small faults. *Chinese Journal of Engineering Geophysics*. 2016;13(1):41-45.
21. Zhen Z. Y., Zheng Y. F., Sun J. L., Gong M. Fault identification method based on the maximum likelihood attribute and its application. *Progress in Geophysics*. 2020;35(1):374-378. <https://doi.org/10.6038/pg2020CC0515>.
22. Qi J., Castagna J. P. Application of PCA fault-attribute and spectral decomposition in Barnett Shale fault detection. In: *83rd Annual International Meeting, SEG, Expanded Abstracts*. 2013:1421-1425.



23. Han L., Zhang H., Wang J. S. Discrete frequency coherency technology for interpreting complicated faults and its application. *Complex Hydrocarbon Reservoirs*. 2016;9(4):16-21. <https://doi.org/10.16181/j.cnki.fzyqc.2016.04.004>.

24. Barbato U., Castagna J. P., Portniaguine O. Composite attribute from spectral decomposition for fault detection. In: *84th Annual International Meeting, SEG, Expanded Abstracts*. 2014:2542-2546.

25. Chen G. F., Lu S. B. Application of RGB frequency division technology in the fault identification of fault-block

reservoir. In: *SEG Technical Program Expanded Abstracts 2014*. Tulsa: Society of Exploration Geophysicists; 2014. P. 2542–2546.

26. Chen P., Wei X. D., Ren D. Z., et al. Small fault identification based on spectrum decomposition technique. *Oil Geophysical Prospecting*. 2010;45(6):890-894.

27. Ma C. J. Application of multi-scale edge detection technology to fault recognition and fracture zone prediction: a case study of Block Well P691, Chepaizi area. *Petroleum Geology and Recovery Efficiency*. 2021;28(2):85-90. <https://doi.org/10.13673/j.cnki.cn37-1359/te.2021.02.011>.

Список источников

1. Du S. T. Seismic attribute analysis // *Petroleum Geophysics*. 2004. Vol. 2. Iss. 4. P. 12–16.

2. Lu G. H., Yu C. Q., Dong N. The application of post-stack seismic attribute analysis in the oil-gas exploration and development // *Progress in Geophysics*. 2006. Vol. 21. Iss. 1. P. 161–166.

3. Castagna J. P. Recent advances in seismic lithologic analysis // *Geophysics*. 2001. Vol. 66. Iss. 1. P. 42–46. <https://doi.org/10.1190/1.1444918>.

4. Puryear C. I., Castagna J. P. Layer-thickness determination and stratigraphic interpretation using spectral inversion: theory and application // *Geophysics*. 2008. Vol. 73. Iss. 2. P. 37–48. <https://doi.org/10.1190/1.2838274>.

5. Liang C., Castagna J. P., Torres R. Z. Tutorial: spectral bandwidth extension – invention versus harmonic extrapolation // *Geophysics*. 2017. Vol. 82. Iss. 4. P. 1JA–Z33. <https://doi.org/10.1190/geo2015-0572.1>.

6. Castagna J. P., Sun J., Siegfried R. W. Instantaneous spectral analysis: detection of low frequency shadows associated with hydrocarbons // *The Leading Edge*. 2003. Vol. 22. Iss. 2. P. 120–127. <https://doi.org/10.1190/1.1559038>.

8. Castagna J. P. Comparison of spectral decomposition methods // *First Break*. 2006. Vol. 24. Iss. 3. P. 75–79. <https://doi.org/10.3997/1365-2397.24.1093.26885>.

10. Widess M. B. How thin is a thin bed // *Geophysics*. 1973. Vol. 38. Iss. 6. P. 1176–1180. <https://doi.org/10.1190/1.1440403>.

7. Zhang R., Castagna J. P. Seismic sparse-layer reflectivity inversion using basis pursuit decomposition // *Geophysics*. 2011. Vol. 76. Iss. 6. P. 147–158. <https://doi.org/10.1190/geo2011-0103.1>.

9. Castagna J. P., Oyem A., Portniaguine O., Aikulola U. Phase decomposition // *Interpretation*. 2016. Vol. 4. Iss. 3. P. SN1. <https://doi.org/10.1190/INT-2015-0150.1>.

11. Chopra S., Castagna J. P., Portniaguine O. Seismic resolution and thin-bed reflectivity inversion // *CSEG Recorder*. 2006. Vol. 11. Iss. 2. P. 19–25.

12. Mora D., Castagna J. P., Meza R., Chen S., Jiang R. Case study: seismic resolution and reservoir characterization of thin sands using multiattribute analysis and bandwidth extension in the Daqing field, China // *Interpretation*. 2020. Vol. 8. Iss. 1. P. 1F-T215. <https://doi.org/10.1190/INT-2019-0017.1>.

13. Duan Y. X., Cao J., Sun Q. F. Application of auto-adaptive dip-steering technique to fault recognition // *Litho-logic Reservoirs*. 2017. Vol. 29. Iss. 4. P. 101–107.

<https://doi.org/10.3969/j.issn.1673-8926.2017.04.012>.

14. Tian T., Xia T. X., Yan T., et al. Application of formation dip in the fine description of fault: take A oilfield in Bohai bay basin as an example // *Progress in Geophysics*. 2017. Vol. 32. Iss. 5. P. 2236–2240.

15. Xu D. K., Wang Y. Y., Zheng J. F. Dip steering coherent-enhancing filtering and its application on seismic data of complex fault-block // *Progress in Geophysics*. 2016. Vol. 31. Iss. 3. P. 1224–1228. <https://doi.org/10.6038/pg20160340>.

16. Yin C., Du X. D., Zhao R. M., et al. Dip steered structure oriented filter and its application // *Progress in Geophysics*. 2014. Vol. 29. Iss. 6. P. 2818–2822.

17. Yin X. Y., Gao J. H., Zong Z. Y. Curvature attribute based on dip scan with eccentric window // *Chinese Journal of Geophysics*. 2014. Vol. 57. Iss. 10. P. 3411–3412.

18. Wang J., Wang R. Fault identification method based on variance-coherence cubes // *Chinese Journal of Engineering Geophysics*. 2016. Vol. 13. Iss. 1. P. 46–51. <https://doi.org/10.3969/j.issn.1672-7940.2016.01.008>.

19. Li T. T., Hou S. Y., Ma S. Z., Li D. L. Overview and research progress of fault identification method // *Progress in Geophysics*. 2018. Vol. 33. Iss. 4. P. 1507–1514. <https://doi.org/10.6038/pg2018BB0311>.

20. Huang C., Li P. F., Wang T. Y., et al. The application of seismic attribute analysis technology to the identification of small faults // *Chinese Journal of Engineering Geophysics*. 2016. Vol. 13. Iss. 1. P. 41–45.

21. Zhen Z. Y., Zheng Y. F., Sun J. L., Gong M. Fault identification method based on the maximum likelihood attribute and its application // *Progress in Geophysics*. 2020. Vol. 35. Iss. 1. P. 374–378. <https://doi.org/10.6038/pg2020CC0515>.

22. Qi J., Castagna J. P. Application of PCA fault-attribute and spectral decomposition in Barnett Shale fault detection // *83rd Annual International Meeting, SEG, Expanded Abstracts*. 2013. P. 1421–1425.

23. Han L., Zhang H., Wang J. S. Discrete frequency coherency technology for interpreting complicated faults and its application // *Complex Hydrocarbon Reservoirs*. 2016. Vol. 9. Iss. 4. P. 16–21. <https://doi.org/10.16181/j.cnki.fzyqc.2016.04.004>.

24. Barbato U., Castagna J. P., Portniaguine O. Composite attribute from spectral decomposition for fault detection // *84th Annual International Meeting, SEG, Expanded Abstracts*. 2014. P. 2542–2546.

25. Chen G. F., Lu S. B. Application of RGB frequency



division technology in the fault identification of fault-block reservoir // SEG Technical Program Expanded Abstracts 2014. Tulsa: Society of Exploration Geophysicists, 2014. P. 2542–2546.

26. Chen P., Wei X. D., Ren D. Z., et al. Small fault identification based on spectrum decomposition technique // Oil Geophysical Prospecting. 2010. Vol. 45. Iss. 6.

P. 890–894.

27. Ma C. J. Application of multi-scale edge detection technology to fault recognition and fracture zone prediction: a case study of Block Well P691, Chepaizi area // Petroleum Geology and Recovery Efficiency. 2021. Vol. 28. Iss. 2. P. 85–90. <https://doi.org/10.13673/j.cnki.cn37-1359/te.2021.02.011>.

Information about the authors / Информация об авторах



Renqi Jiang, Ph.D, Academician of Russian Natural Science Academy, CEO of Beijing Carrie Oriental Petroleum Technology Company. He got his B. Sc of geology from Daqing Petroleum University (1983), M.Sc. of geology from graduate school of RIPED Beijing (1987), Ph.D of geology from the University of Oklahoma (1997). He has served in several technical and management positions in several international oil companies, and founded the Lumina technologies companies in Houston of US and Beijing Carrie Oriental Petroleum Technology company in Beijing of China. Furthermore, he has more than 30 years of rich experience in the fields of management, operation, technical study. His technical skills are mainly in the field of geology, geophysics, enhanced oil recovery, tools for horizontal well completion and fracturing.

Жэньци Цзян – доктор философии, академик Российской академии естественных наук, генеральный директор компании «Биджинг Кари Ориентал Петролеум Технолджиз», получил степень бакалавра геологических наук в Дацинском нефтяном университете (1983 г.), степень магистра геологических наук в магистратуре Научно-исследовательского института разведки и добычи углеводородов в Пекине (1987 г.), степень доктора геологии в Университете Оклахомы (1997 г.); занимал некоторые инженерные и руководящие должности в нескольких международных нефтяных компаниях; основал компанию «Люмина Технолджиз» в Хьюстоне (Соединенные Штаты Америки) и компанию «Биджинг Кари Ориентал Петролеум Технолджиз» в Пекине (Китай). Кроме того, имеет более чем 30-летний богатый опыт работы в области управления, эксплуатации, технических исследований. Его инженерные навыки в основном относятся к области геологии, геофизики, увеличения нефтеотдачи, инструментов для заканчивания горизонтальных скважин и гидроразрыва пласта.

Renqi Jiang,

Ph.D, Academician,
Beijing Carrie Oriental Petroleum Technology Company,
Beijing, China,
Lumina Technologies,
Houston, United States of America,
renqi.jiang@carrieenergy.com,
renqi.jiang@luminageo.com.

Цзян Жэньци,

доктор философии, академик,
компания «Биджинг Кари Ориентал Петролеум Технолджиз»,
г. Пекин, Китай,
компания «Люмина Технолджиз»,
г. Хьюстон, Соединенные Штаты Америки,
renqi.jiang@carrieenergy.com,
renqi.jiang@luminageo.com.

John P. Castagna,

Ph.D,
GeoPhysics Graduate Advisor,
Professor of Geophysics, Margaret S. and Robert E. Sheriff Endowed Faculty Chair in Applied Seismology,
University of Houston,
Houston, United States of America.

Джон П. Кастанья,

доктор философии,
советник по курсам по геофизике для студентов-выпускников,
профессор кафедры геофизики факультета прикладной сейсмологии,
финансируемого Благотворительным фондом им. Маргарет С. и Роберта Э. Шериф,
Хьюстонский университет,
г. Хьюстон, Соединенные Штаты Америки.



Jian Wu,

Dr. Petroleum Geology,

Senior Geologist,

The Research Institute of Petroleum Exploration and Development, PetroChina,
Beijing, China.

Цзянь У,

доктор геологических наук,

старший геолог,

Научно-исследовательский институт разведки и добычи углеводородов компании «Петрочайна»

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 05.09.2022; approved after reviewing 02.10.2022; accepted for publication 08.11.2022.

Статья поступила в редакцию 05.09.2022; одобрена после рецензирования 02.10.2022; принята к публикации 08.11.2022.



Научная статья

УДК 553.9

<https://doi.org/10.21285/2686-9993-2022-45-4-345-366>



Нефтегазоносные комплексы – вещественное выражение геофлюидодинамических систем

Лариса Александровна Рапацкая^a

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

Резюме. Целью представленного исследования являлся анализ геофлюидодинамической концепции нефтегазообразования. В ходе работы были использованы авторские данные о строении, составе и мощностях разновозрастных нефтегазоносных комплексов Сибирской платформы (Россия). Нефтегазоносные комплексы, выделение которых является результатом комплексирования геологических, геохимических и геофизических исследований, проводимых при нефтегазогеологическом районировании и эксплуатационных работах, представлены в качестве вещественного выражения геофлюидодинамических систем. Любая геофлюидодинамическая система включает очаги генерации углеводородов, пути миграции нефти и газа, типы резервуаров и ловушек, литологический состав пород-коллекторов и флюидоупоров, а также контролируется благоприятным сочетанием их появления в геологическом времени и пространстве. Ординарная флюидодинамическая система представляет углеводородные растворы, созданные очагами генерации нефти и газа, которые являются примером банальной дефлюидизации нефтегазоматеринских пород осадочного бассейна. Данная работа позволила впервые выделить элементы разновозрастных геофлюидодинамических систем, представить их вещественное выражение в виде разновозрастных нефтегазоносных комплексов, проанализировать состав углеводородов на примере отдельных месторождений разных нефтегазоносных областей. Кроме того, в ходе исследования были рассмотрены возможные очаги генерации углеводородных флюидов и пути их миграции. Нефти месторождений разного возраста нефтегазоносных провинций Сибирской платформы отличаются разным составом и плотностью. В то же время, согласно многочисленным имеющимся данным, они относятся к единому генетическому типу, для которого характерно преобладание метановых углеводородов.

Ключевые слова: геофлюидодинамическая система, Сибирская платформа, нефтегазоносные комплексы, осадочные бассейны, месторождения нефти и газа, очаги генерации, пути миграции, зоны нефтегазоаккумуляции, продуктивные горизонты, состав нефти

Для цитирования: Рапацкая Л. А. Нефтегазоносные комплексы – вещественное выражение геофлюидодинамических систем // Науки о Земле и недропользование. 2022. Т. 45. № 4. С. 345–366. <https://doi.org/10.21285/2686-9993-2022-45-4-345-366>.

Original article

Oil and gas complexes as a material expression of geofluid dynamic systems

Larisa A. Rapatskaya^a

^aIrkutsk National Research Technical University, Irkutsk, Russia

Abstract. The purpose of the present research is to analyze the geofluid dynamic concept of oil and gas formation. The research uses the author's data on the structure, composition and thickness of multi-aged oil and gas complexes of the Siberian platform (Russia). The oil and gas complexes identified as a result of the integrated geological, geochemical and geophysical studies carried out under oil and gas geological zoning and operational work are presented as a material expression of geofluid dynamic systems. Any geofluid dynamic system includes hydrocarbon generation centers, oil and gas migration routes, types of reservoirs and traps, lithological composition of reservoir rocks and reservoir cap rocks. Also it is controlled by a favorable combination of their appearance in geological time and space. An ordinary fluid dynamic system is presented by hydrocarbon solutions generated by oil and gas generation centers, which are examples of a trivial defluidization of oil and gas source rocks of a sedimentary basin. This study allowed to be the first who has identified the elements of multi-age geofluid dynamic systems, presented their material expression in the form of multi-age oil and gas bearing complexes as well as analyzed the composition of hydrocarbons on the example of individual deposits of various

© Рапацкая Л. А., 2022



oil and gas-bearing areas. Besides, possible generation centers of hydrocarbon fluids and ways of their migration were investigated. Oil fields of different ages of the oil and gas bearing provinces of the Siberian Platform feature different composition and density, whereas according to numerous available data, they belong to a single genetic type, which is characterized by the predominance of methane hydrocarbons.

Keywords: geofluid dynamic system, Siberian platform, oil and gas bearing complexes, sedimentary basins, oil and gas fields, generation centers, migration routes, oil and gas accumulation zones, productive horizons, composition of oil

For citation: Rapatskaya L. A. Oil and gas complexes as a material expression of geofluid dynamic systems. *Nauki o Zemle i nedropol'zovanie = Earth sciences and subsoil use*. 2022;45(4):345-366. (In Russ.). <https://doi.org/10.21285/2686-9993-2022-45-4-345-366>.

Введение

В последние десятилетия XX и начале XXI века в работах по геологии нефти и газа ряда ученых, таких как Г. Л. Поспелов, А. Е. Гуревич, О. В. Равдоникас, С. М. Сапрыгин, А. В. Кудельский, Р. Г. Гарецкий, Р. Е. Айзенберг, Б. А. Соколов, Э. А. Абля, Н. П. Запивалов, И. П. Попов, В. Н. Нестеров, В. В. Харахинов, А. А. Семянов, С. И. Шленкин, А. Ф. Глебов, активно развивается флюидодинамическое направление исследований, для которого характерно появление и исследование понятия «флюидодинамическая система». В 1989 г. на Всесоюзном совещании «Флюидодинамический фактор в тектонике и нефтегазоносности осадочных бассейнов» в Ашхабаде Б. А. Соколов и В. Е. Хаин представили (гео)флюидодинамическую модель нефтегазообразования в осадочных бассейнах, в которой раскрылся главный механизм превращения осадочного бассейна в нефтегазоносный. Литосфера рассматривалась как материальная система – вмещище флюидов как продуктов дегидратации и дефлюидизации органического вещества и пород во взаимодействии с энергетической системой, обеспечивающей тепломассоперенос в масштабе осадочного бассейна.

Материалы и методы исследования

В основе предлагаемой флюидодинамической модели лежат представления о нефтегазообразовании как универсальном процессе, закономерно сопровождающем развитие любого осадочного бассейна [1–3]. Определение флюидодинамической системы применитель-

но к нефти и газу дано в монографии Б. А. Соколова, Э. А. Абля: «Углеводородные растворы, генерируемые очагами генерации нефти и газа, являются примером банальной дефлюидизации нефтегазоматеринских пород осадочного бассейна – ординарной флюидодинамической системой» [1]. Следует отметить, что в физическом выражении флюидодинамическая система, как и любая другая, является объектом крайне нестабильным, изменяющимся во времени и пространстве, но имеющим свое достаточно равновесное вещественное выражение в виде нефтегазоносного комплекса. Физическое состояние флюидодинамической системы характеризуется целым рядом взаимосвязанных параметров: температурой, давлением, объемом и массой [4, 5]. Соотношения этих параметров определяют динамику флюидодинамической системы, интенсивность генерации и насыщения углеводородами, направление миграции флюидов, формирование и фазовый состав залежей [6].

По современным представлениям «нефтяная система» – это комплекс отложений определенной области развития нефтегазоносного бассейна, связанный проявлением процессов формирования нефтегазоносности^{1,2}. Нефтяная система включает нефтегазоматеринские свиты, пути миграции углеводородов, породы-коллекторы, флюидоупоры и ловушки, а также контролируется благоприятным сочетанием их появления в геологическом времени и пространстве.

В основу флюидодинамической концепции нефтегазообразования положено представление о единстве триады, состоящей из таких

¹ Мальцева А. К., Бакиров Э. А., Ермолкин В. И., Ларин В. И., Каламкарров Л. В., Рожков Э. Л. Геология нефти и газа и нефтегазоносные провинции: учебник для вузов. М.: Изд-во ГАНГ, 1998. 175 с.

² Рапацкая Л. А., Тонких М. Е., Вахромеев А. Г., Буглов Н. А. Нефтегазоносные комплексы: учебник для студентов вузов. Иркутск: Изд-во ИРНИТУ, 2016. 451 с.



объектов: очаг генерации ↔ место образования флюидов; пути миграции ↔ каналы движения флюидов; зоны аккумуляции ↔ местоскопления флюидов ⇒ флюидодинамическая система.

В вещественном физико-химическом выражении эту триаду можно представить как нефтегазоносный комплекс, включающий следующее: местоскопление ↔ резервуар; резервуар ↔ ловушка; ловушка ↔ коллектор, флюидоупор ⇒ нефтегазоносный комплекс.

Классификация нефтегазоносного районирования А. А. Бакирова основана на тектоническом принципе, на котором построена иерархическая система с выделением таких единиц соподчинения, как нефтегазоносная территория, область, район, зона, месторождение, залежь углеводородов³. Нефтегазо-геологическое районирование проводится не только пространственно, но и в геологическом разрезе исследуемых территорий. Основными единицами разреза являются нефтегазоносная формация, региональный, субрегиональный, зональный нефтегазоносные комплексы, нефтегазоносный горизонт, нефтегазоносный пласт.

В естественных сложных разрезах крупных региональных структур выделяют литолого-стратиграфические подразделения, которые состоят из нескольких формаций или их частей. Эти литолого-стратиграфические подразделения А. А. Бакиров предложил называть нефтегазоносными комплексами, или региональными нефтегазоносными комплексами⁴. Следует отметить, что важной характеристикой региональных нефтегазоносных комплексов является возраст, то есть стратиграфическое положение в разрезе.

Каждый региональный нефтегазоносный комплекс охватывает некую совокупность осадочных пород, составляющую три части этого комплекса: нефтепроизводящую (нефтематеринскую) толщу; нефтесодержащую (коллекторскую) толщу, где нефть или газ накапливаются, образуя местоскопление; перекрываю-

щую (экранирующую) толщу, обеспечивающую сохранность залежей. Иногда в разрезе эти толщи повторяются, причем неоднократно, создавая крупные резервуары углеводородов.

Сибирская платформа характеризуется самым масштабным возрастным диапазоном нефтегазоносных комплексов по разрезу. Ранее⁵ нами были выделены:

- рифейский нефтегазоносный комплекс краевых (перикратонных) и интракратонных рифейских бассейнов Байкитской антеклизы, Катангской седловины – самый древний нефтегазоносный комплекс на планете;

- вендский (венд-кембрийский) и кембрийский нефтегазоносные комплексы Непско-Ботуобинской антеклизы, Ангара-Ленской ступени и Предпатомского прогиба;

- пермско-мезозойские газонаосные комплексы Вилуйской синеклизы и Предверхоянского прогиба;

- мезозойские нефтегазоносные комплексы Енисей-Хатангского, Анабаро-Хатангского и Лено-Анабарского прогибов;

- кайнозойский газонаосный комплекс озера Байкал – самый молодой на планете.

Древнейшие нефтегазоносные комплексы приурочены к Лено-Тунгусской синеклизе (Лено-Тунгусская нефтегазоносная провинция) Сибирской платформы, на которой выделено до 26 нефтегазоносных областей. Наиболее изучены Непско-Ботуобинская, Ангара-Ленская, Байкитская, Собинская и Катангская нефтегазоносные области, содержащие две трети разведанных запасов углеводородного сырья Восточной Сибири. По оценке Института нефтегазовой геологии и геофизики им. А. А. Трофимука Сибирского отделения Российской академии наук и Сибирского научно-исследовательского института геологии, геофизики и минерального сырья, общие количество ресурсов на территории и акватории Восточной Сибири и Дальнего Востока составляет: нефти – 20–22 млрд т; попутного газа – 1,5–2 трлн м³; свободного газа – 58–61 трлн м³; конденсата – 3–5 млрд т.

³ Мальцева А. К., Бакиров Э. А., Ермошкин В. И., Ларин В. И., Каламбаров Л. В., Рожков Э. Л. Геология нефти и газа и нефтегазоносные провинции: учебник для вузов. М.: Изд-во ГАНГ, 1998. 175 с.

⁴ Там же.

⁵ Рапацкая Л. А., Тонких М. Е., Вахромеев А. Г., Буглов Н. А. Нефтегазоносные комплексы: учебник для студентов вузов. Иркутск: Изд-во ИРНИТУ, 2016. 451 с.



Для каждой нефтегазоносной области по результатам геолого-разведочных работ определены свои уровни промышленной нефтегазоносности – региональные нефтегазоносные комплексы. Залежи нефти и газа установлены в рифейском, рифей-вендском, вендском и верхневендско-нижнекембрийском нефтегазоносных комплексах.

В пределах региональных нефтегазоносных комплексов выделяются зоны нефтегазо-накопления, занимающие относительно небольшую, но наиболее перспективную часть с соответствующей системой ловушек, то есть такому их сочетанию, которое подчинено одному из основных факторов (структурному, литологическому или гидродинамическому), играющему решающую роль при нефтегазо-накоплении. Степень обогащенности зон нефтегазо-накопления относительно смежных территорий и характер распределения залежей определяются почти исключительно условиями аккумуляции углеводородов и сохранностью сформированных залежей в ходе последующей истории геологического развития региона. Если систему ловушек характеризует неоднородность пород по физическим параметрам (пористости проницаемости), то механизм аккумуляции определяется свойствами заключенных в коллекторах флюидов.

Многие исследователи считают, что наиболее активно процессы массопереноса во флюидных потоках осуществляются в зонах долгоживущих глубинных разломов, маркирующих борта региональных континентальных прогибов, поднятий и рифтогенных структур. Острую полемику в общей схеме образования нефтяных и газовых залежей «генерация – миграция – аккумуляция» вызывает первый пункт, связанный с источником углеводородов и путями их миграции, но при всех возможных вариантах генерации флюидодинамические процессы играют ключевую роль.

На территории Сибирской платформы выделяют две нефтегазоносные провинции: Лено-Тунгусскую (2,9 млн км²), охватывающую всю центральную часть платформы с древними рифей-нижнепалеозойскими нефтегазоносными комплексами, и Хатангско-Вилуйскую (0,5 млн км²) с верхнепалеозой-мезозойскими нефтегазоносными комплексами.

По окраинам платформа окружена перикратонными (краевыми) прогибами: с севера – Енисей-Хатангским, с северо-востока – Предверхоянским, с востока-юго-востока – Предпатомским и с запада – Предъенисейским и Ангари-Котуйским. Все прогибы обладают определенной общностью признаков: значительным прогибанием в течение длительного времени; накоплением мощных толщ осадков с большим количеством органики; интенсивным прогревом в процессе дальнейшего развития, то есть могут служить очагами генерации углеводородов. По площадям распространения, объемам нефтегазоносных толщ, интенсивности процессов нефтегазообразования на территории Лено-Тунгусской нефтегазоносной провинции В. И. Соболев с соавторами выделяют несколько крупных палеоочагов нефтегазообразования, размещение которых в значительной мере определяется положением крупных осадочных палеобассейнов – Енисейского, Чуньско-Котуйского, Иркинеево-Ванаварского и Предпатомского (рис. 1) [7].

Тектонические структуры с одноименными нефтегазоносными областями, как правило, территориально сопряжены с прогибами, к которым приурочены очаги нефтегазогенерации. Так, Байkitская нефтегазоносная область на территории Байkitской антеклизы граничит с запада с Енисейским палеоочагом (современный Енисейский кряж), а Непско-Ботуобинская нефтегазоносная область на территории Непско-Ботуобинской антеклизы с востока и юго-востока граничит с Предпатомским палеоочагом (современный Предпатомский прогиб).

На сводах Байkitской и Непско-Ботуобинской антеклиз, где расположены крупные скопления углеводородов, вендские терригенные и карбонатные породы базальных уровней вендско-кайнозойского разреза местами налегают на кристаллические комплексы фундамента. Это может означать, что здесь непосредственно под породами-коллекторами нет нефтематеринских отложений, а углеводороды попали в них из очагов нефтегазогенерации путем не вертикальной, а латеральной миграции. Можно предположить, что область генерации углеводородов, аккумулированных на сводах Непско-Ботуобинской и Байkitской



антеклиз, расположена в пределах пространственно и структурно разделяющей их Катангской седловины.

Сама идея сопряжения процессов генерации и аккумуляции углеводородов не нова. Академиком А. А. Трофимуким такие объекты

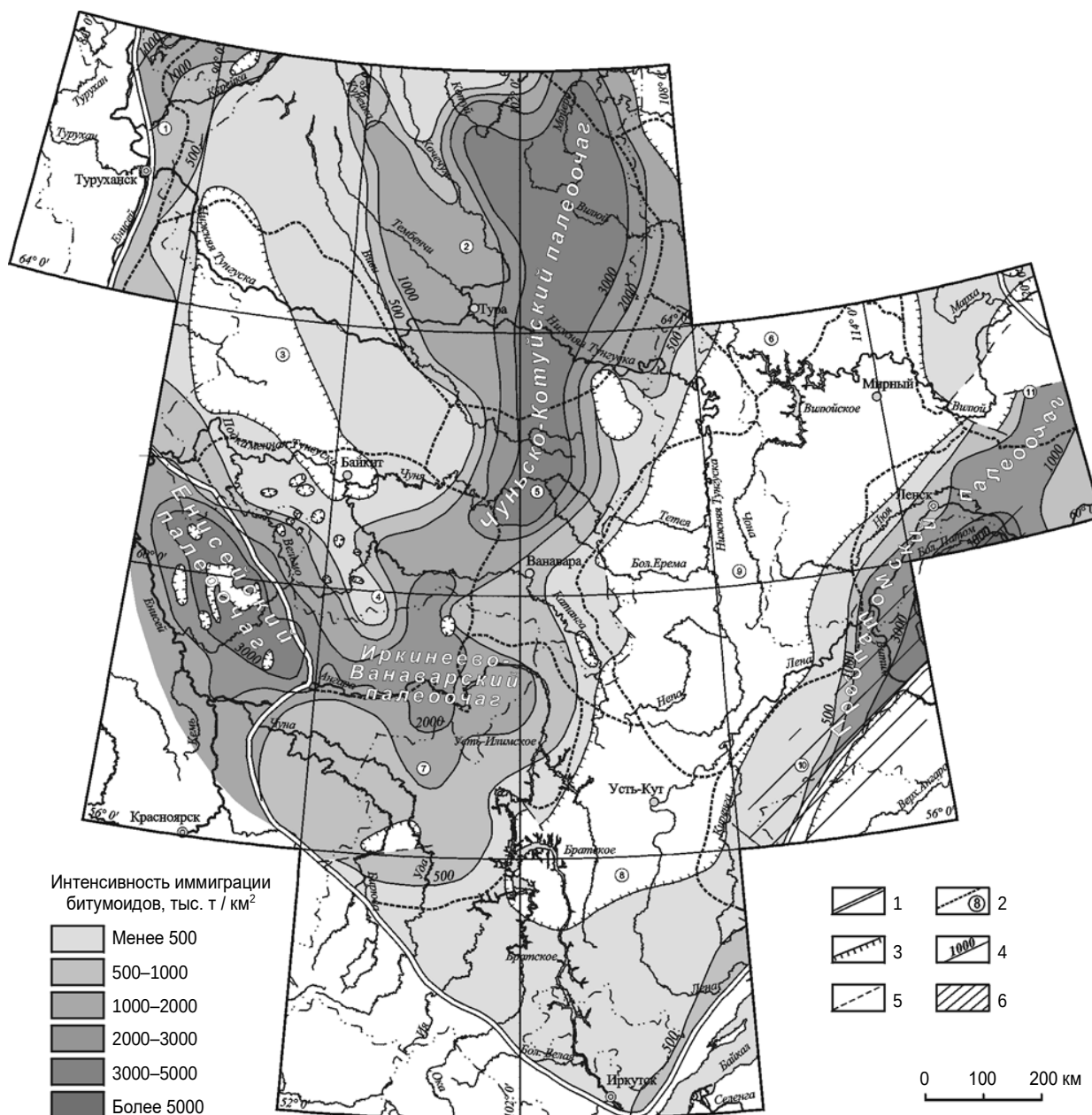


Рис. 1. Схематическая карта интенсивности эмиграции битумоидов

в рифейских отложениях Лено-Тунгусской нефтегазоносной провинции [7]:

- 1–3 – границы: 1 – Лено-Тунгусской нефтегазоносной провинции, 2 – нефтегазоносных областей (1 – Туруханско-Норильский нефтегазоносный район, 2 – Северо-Тунгусская, 3 – Южно-Тунгусская, 4 – Байкитская, 5 – Катангская, 6 – Сюджерская, 7 – Присяно-Енисейская, 8 – Ангара-Ленская, 9 – Непско-Ботубобинская, 10 – Предпатомская, 11 – Западно-Вилуйская области), 3 – современного распространения отложений; 4 – изолинии интенсивности эмиграции битумоидов, тыс. т/км²; 5 – разрывные нарушения; 6 – зоны шарьяжных перекрытий

Fig. 1. Schematic map of bitumoid emigration intensity

in the Riphean deposits of the Lena-Tunguska oil and gas province [7]:

- 1–3 – boundaries of: 1 – the Lena-Tunguska oil and gas bearing province, 2 – oil and gas bearing areas (1 – Turukhano-Norilsk oil and gas bearing area, 2 – North-Tunguska, 3 – South-Tunguska, 4 – Baikit, 5 – Katanga, 6 – Sugdzerskaya, 7 – Sayan-Yenisei, 8 – Angara-Lena, 9 – Nepa-Botuoba, 10 – Fore-Patoma, 11 – West-Viluy areas), 3 – modern distribution of sediments; 4 – isolines of bitumoid emigration intensity, thousand t/km²; 5 – faults; 6 – areas of overthrust-folding overlaps



описывались как «котлы-реакторы» [8]. А. Э. Конторович обосновывал совмещение (сближение) очагов нефтегазообразования и зон нефтегазоаккумуляции геодинамической концепцией нафтидогенеза в осадочных бассейнах [9]. Д. И. Дробот, оценивая колоссальные объемы углеводородов положительных структур Непско-Ботубинской антеклизы, Ангара-Ленской ступени и Байkitской антеклизы, объяснял их чрезвычайную насыщенность месторождениями углеводородов сопряжением с генерационными комплексами нефтегазообразования древних Прибайкало-Патомского и Приенисейско-Иркинеевско-Чадобецкого очагов [10].

Байkitская антеклиза (рифейский нефтегазоносный комплекс). Байkitская антеклиза принадлежит южной части Байkitской нефтегазоносной области Лено-Тунгусской нефтегазоносной провинции и граничит на западе с Енисейским кряжем, а на востоке – с Курейской синеклизой (рис. 2). Главными объектами поисков месторождений углеводородов с промышленной нефтегазоносностью здесь являются рифейский комплекс с залежами нефти (или газа) в карбонатных коллекторах каверно-трещинного типа, вендский комплекс с залежами в терригенных коллекторах порового и трещинно-порового типа, а также венд-нижнекембрийский комплекс с зале-

жами в карбонатных коллекторах кавернового и каверно-порового типа.

В центральной части Камовского свода Байkitской антеклизы бурением вскрыты разрезы кембрия, венда, рифея и выделены две зоны нефтегазоаккумуляции: Юрубчено-Тохомская с рифейским нефтегазоносным комплексом и Оморинская с вендским нефтегазоносным комплексом. Зоны объединены в Куюмбинско-Юрубчено-Тохомский ареал.

Куюмбинско-Юрубчено-Тохомский ареал – уникальный нефтегазогеологический объект не только для Сибирской платформы, но и для территории всей планеты. Гигантское скопление углеводородов в виде двух крупнейших месторождений – Куюмбинского и Юрубчено-Тохомского – было обнаружено здесь в древнейшем рифейском карбонатном каверново-трещинном резервуаре, характеризующимся чрезвычайной сложностью строения. А. А. Трофимук назвал его Куюмбо-Юрубчено-Тайгинским супергигантом [12]. В позднем докембрии (рифей, венд) на месте современного Байкало-Патомского нагорья накопились мощные толщи, обогащенные органическим веществом. Образовавшиеся на значительных глубинах в соответствующих термобарических условиях, они сформировали крупнейший Предпатомский палеоочаг нефтегазообразования, миграция углеводо-

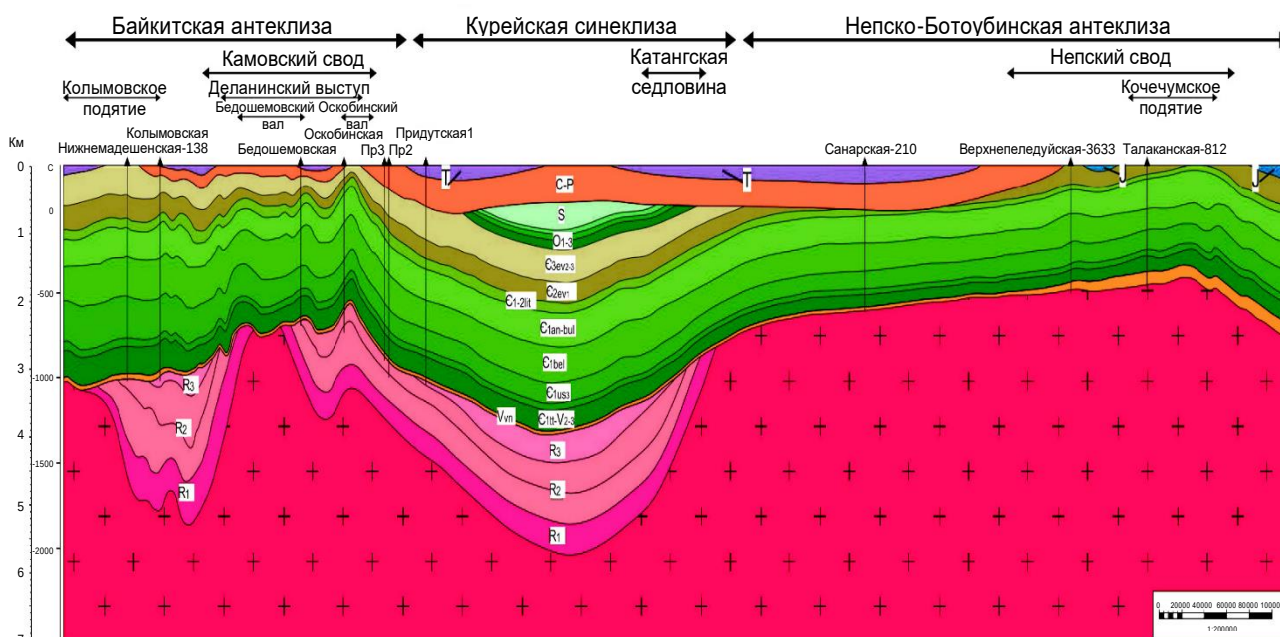


Рис. 2. Сейсмогеологический профиль Байkitской антеклизы по линии II-II [11]

Fig. 2. Seismogeological profile of the Baykitская antekliza along the line II-II [11]



родов из которого проходила в резервуары сопряженных положительных структур Байкитской антеклизы (см. рис. 1). Присутствие в разрезах кембрия и частично венда мощных соленосных толщ обеспечило в дальнейшем необходимые условия для длительного сохранения скоплений углеводородов. Архейско-нижнепротерозойский кристаллический фундамент Байкитской антеклизы вскрыт глубоким бурением на ряде площадей (Юрубченская, Куюмбинская и другие) на глубинах 2–4 км. Осадочный чехол представлен отложениями рифейского, вендского, кембрийского возрастов и частично маломощными отложениями более молодого возраста. Общая мощность отложений осадочного чехла во впадинах может превышать 7–10 км [13].

Куюмбинское газоконденсатно-нефтяное месторождение находится в центральной части Камовского свода Байкитской антеклизы, на структурном выступе северо-восточного склона. Выступ связан с одним из центральных наиболее приподнятых блоков свода и осложнен серией продольных тектонических нарушений. Данное месторождение является первым в мире месторождением, на котором была доказана промышленная нефтегазоносность рифейских карбонатных толщ.

Куюмбинское месторождение входит в состав Юрубчено-Тохомской зоны нефтегазонакопления, приурочено к природному резервуару в докембрийских, в основном рифейских, преимущественно доломитовых кавернозно-карстово-трещинных породах-коллекторах, перекрытых слабоконтрастным венд-нижнепалеозойским чехлом. Вскрытая мощность рифейских отложений меняется от 0 до 1030 м, глубина до эрозионной поверхности колеблется от 2145 до 2340 м. Продуктивным горизонтом является дезинтегрированная толща рифея, представленная преимущественно доломитами, а флюидоупором служат сульфатно-карбонатные отложения верхнего венда [13].

В рифейских отложениях месторождения открыто несколько залежей углеводородов: Северо-Куюмбинская, Южно-Куюмбинская I, Южно-Куюмбинская II, отделенных друг от друга узкой зоной пород-неколлекторов. Залежи расположены на глубинах 2,4–2,5 км и отличаются существенной неравномерностью

продуктивности (приточности), связанной с резко неоднородным строением рифейского резервуара. Границами залежей служат выступы фундамента, выходы на эрозионную поверхность преимущественно глинистых толщ рифея и отдельные разломы. Северо-Куюмбинская залежь нефтегазовая, массивная, сводовая, стратиграфически, литологически и тектонически ограниченная, высота ее достигает 250 м, из них 170 м составляет нефтяная часть. Южно-Куюмбинская залежь по типу аналогична Северо-Куюмбинской залежи высотой до 80 м [14].

Нефть продуктивных отложений Куюмбинского газоконденсатно-нефтяного месторождения особо легкая (средняя плотность нефти в стандартных условиях составляет 0,819 г/см³), маловязкая (вязкость – 6,4 мПа·с). По содержанию смол нефть относится к малосмолистому типу, количество смолистых компонентов равно 3,83 %, малопарафинистая (0,9 % парафина), малосернистая (0,127 % серы). Свободный газ продуктивных отложений по составу относится к метановым. Содержание метана составляет в среднем 76,97 % [15].

Катангская седловина (рифей-вендский нефтегазоносный комплекс). Катангская впадина (седловина) служит своеобразным переходным «мостиком» между крупными положительными и отрицательными структурами юга Сибирской платформы: Байкитской и Непско-Ботуобинской антеклизам, Присаяно-Енисейской и Курейской синеклизам. В пределах этой структуры установлены самые древние рифейские отложения: нижняя – ереминская – толща рифея, вскрытая вблизи границы с гранитоидами кристаллического фундамента.

Собинское нефтегазоконденсатное месторождение в соответствии с нефтегазогеологическим районированием приурочено к Катангской нефтегазоносной области Лено-Тунгусской нефтегазоносной провинции. В тектоническом отношении месторождение расположено в пределах Собинского вала, входящего в состав структур Собинско-Тэтэринского выступа, осложненного локальными поднятиями. Вал является крупной горстообразной структурой, амплитуда его вертикального смещения превышает 200 м.



Геологический разрез месторождения представлен отложениями протерозоя, палеозоя, мезозоя и кайнозоя, залегающих на породах консолидированного гетерогенного фундамента архей-протерозойского возраста. Общая толщина осадочных отложений в пределах района по геофизическим данным составляет от 3 до 7 км. Максимальная вскрытая толщина осадочного разреза равна 3713 м (скважина Собинская-131).

Нефтегазоносность Собинского месторождения связана с подсолевыми горизонтами песчаников ванаварской свиты венда. Единичные проявления газа отмечались также в вышележащих терригенных отложениях оскобинской свиты венда. Месторождение многозалежное. Залежи пластовые, сводовые, литологически и тектонически экранированные. Главными факторами скопления нефти и газа является наличие литологических ловушек, связанных с выклиниванием песчаных пластов венда по направлению к Камовскому своду.

Основными нефтегазогенерирующими толщами считаются глинистые породы аянской свиты рифея, обогащенные органическим веществом. Основная часть углеводородов мигрировала по поверхности несогласия между рифеем и вендом, заполняя ловушки в вендских породах. Кроме того, установлено уменьшение мощности битумонасыщенных пластов и изменение состава нафтидов от малых к нефтям вверх по склону Собинского поднятия, что свидетельствует о генетической связи ванаварской битумной залежи и нефтегазоконденсатных месторождений в пределах Собинско-Тэтэринского выступа, сформировавшихся за счет латеральной миграции [16].

Нефти Собинского нефтегазоконденсатного месторождения легкие и средние (плотностью 0,824–0,859 г/см³), малопарафинистые (1,28–3,58 масс. % парафина), малосернистые и сернистые (0,24–1,28 масс. % серы), смолистые (13–14 масс. % смол и асфальтенов). Конденсаты характеризуются низкой плотностью, смолистостью, практически не содержат парафина.

Газовые залежи в основном метанового состава, содержат тяжелые углеводороды, преимущественно этан, а также азот и гелий.

Свободный газ содержит: метана – 62,9–75 %; гомологов метана – до 7,1 %; азота – 23–28,1 %; углекислого газа – 0,2 %. Отмечается высокое (до 0,58 %) содержание гелия. Характерной особенностью газов является повышенное содержание азота, в отдельных пробах достигающее 30–59 %. Сухие высокоазотные газы приурочены к присводовой части месторождения, к крыльям они сменяются более жирными.

Непско-Ботуобинская антеклиз (вендский нефтегазоносный комплекс). Непско-Ботуобинская нефтегазоносная область по площади соответствует Непско-Ботуобинской антеклизе и входит в состав главного пояса нефтегазоносности Лено-Тунгусской нефтегазоносной провинции. В этом поясе находятся почти все открытые в провинции месторождения углеводородов, приуроченные к положительным структурам: Камовскому, Непскому сводам, Мирнинскому выступу, Собинскому валу [17].

Отложения осадочного чехла Непско-Ботуобинской антеклизы залегают на эродированной поверхности пород кристаллического фундамента архей-протерозойского возраста (рис. 3).

Они представлены в основном гранитами, гранодиоритами, в меньшей мере сланцами. На рифейской пенепленизированной поверхности на глубинах 3104–3474 м залегают породы нижнего палеозоя: терригенный комплекс осадков ушаковской свиты (124 м) венда – кембрия и нижнемотской подсвиты (247 м) нижнего кембрия. Непско-Ботуобинская антеклиз (особенно ее северная часть) отличается особо благоприятным расположением на стыке трех крупнейших отрицательных структурных элементов Сибирской платформы (Тунгусский, Вилуйский и Патомский депоцентры).

На ранних этапах формирования осадочного чехла вплоть до среднего кембрия в осадочных бассейнах указанных структур происходила интенсивная генерация углеводородов с одновременной миграцией в сторону приподнятых участков платформы, одним из которых служила Непско-Ботуобинская антеклиз. Источником флюидов для Непско-Ботуобинской нефтегазоносной области является

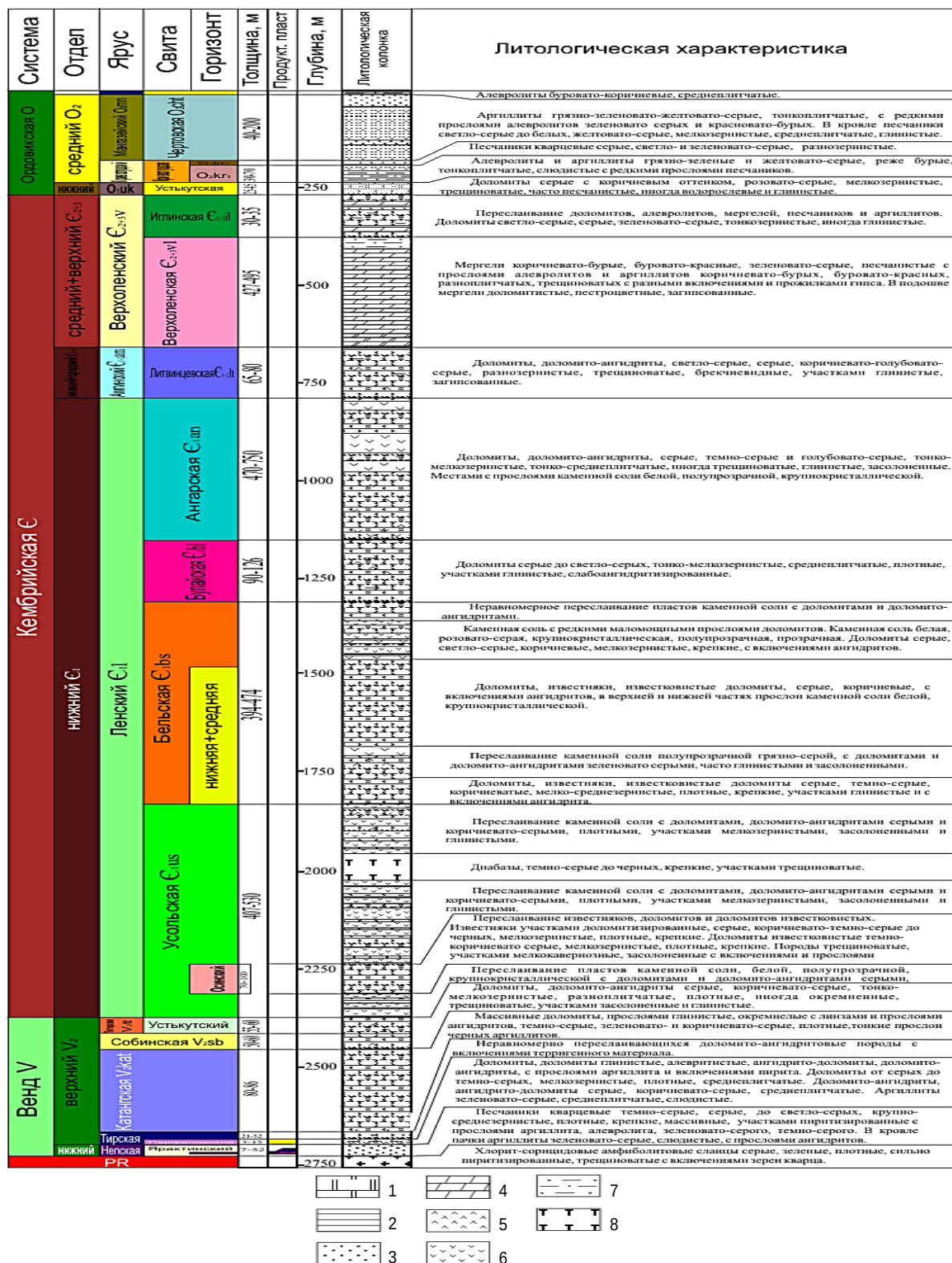


Рис. 3. Сводный геолого-геофизический разрез центральной части Непско-Ботубовской антеклизы⁶:

1 – доломиты; 2 – аргиллиты; 3 – песчаники; 4 – мергели; 5 – ангидриты; 6 – соли; 7 – алевриты; 8 – траппы

Fig. 3. Summary geological and geophysical section of the central part of the Nepa-Botuoba antecline⁶:

1 – dolomites; 2 – mudstones; 3 – sandstones; 4 – marls; 5 – anhydrites; 6 – salts; 7 – siltstones; 8 – traps

⁶ Рапацкая Л. А., Иванов А. Н., Буглов Н. А. Геология нефти и газа: учеб. пособие. Иркутск: Изд-во ИРНИТУ, 2014. 451 с.



Предпатомский прогиб (Предпатомский палеоочаг), где в позднем докембрии (рифей, венд) на больших глубинах накопились мощные толщи, обогащенные органическим веществом, послужившие нефтегазопроизводящими отложениями (см. рис. 1). К такому заключению пришла И. К. Иванова, утверждавшая, что палеотемпературы формирования нефти и конденсатов Непско-Ботубинской нефтегазоносной области значительно «превышают возможные термобарические параметры, существовавшие в прошлом на Непском своде (с учетом палеопогружения венд-кембрийских отложений)» [18]. Это позволило предположить, что газоконденсатные и нефтяные залежи здесь были сформированы за счет латеральной миграции флюидов из Предпатомского прогиба, в котором материнские отложения были погружены на большие глубины [18].

Вещественным выражением флюидодинамических систем, сгенерированных в палеоочаге, служат три нефтегазоносных комплекса в осадочном чехле Непско-Ботубинской антеклизы: кембрийский, венд-кембрийский и вендский, содержащие более 20 продуктивных пластов, выделенных и прослеженных на основе детальной корреляции отложений, анализа литологического состава и фильтрационно-емкостных свойств коллекторов продуктивных горизонтов.

Чаяндинское нефтегазоконденсатное месторождение в тектоническом отношении находится в северо-восточной части Непско-Пеледуйского свода, осложняющего Непско-Ботубинскую антеклизу, в зоне сочленения его с Мирнинским выступом на севере и Нюйско-Джербинской впадиной Предпатомского прогиба на востоке. Месторождение приурочено к крупной неантиклинальной ловушке, связанной с зоной регионального выклинивания коллекторов венда вверх по восстанию пластов в сторону Непско-Пеледуйского свода. В строении и нефтегазоносности терригенных продуктивных горизонтов Чаяндинского месторождения главную роль играют структурный и литологический факторы. В условиях преимущественного моноклиналиного залегания продуктивных отложений большое влияние на образование неантиклинальных ловушек ока-

зывают многочисленные разрывные нарушения [19].

Геологический разрез месторождения представлен нижнепротерозойскими породами кристаллического фундамента, а также вендскими, кембрийскими, юрскими и четвертичными отложениями осадочного чехла, большая часть которого сложена терригенно-карбонатными отложениями венда и галогенно-карбонатными отложениями кембрия.

В пределах Чаяндинского месторождения промышленные скопления углеводородов выявлены в трех горизонтах: ботубинском, хамакинском и талахском [19]. Также на ограниченной площади продуктивен вилучанский горизонт, но по строению газовой залежи он составляет единый резервуар с талахским горизонтом. Основные запасы нефти приурочены к залежи ботубинского продуктивного горизонта, высота которого достигает 330 м.

Большинство исследователей считает ботубинский горизонт возрастным аналогом парфеновского. Он приурочен к нижней (ботубинской) подсвите буюской свиты венда, на 85–90 % сложен преимущественно кварцевыми, полевошпаткварцевыми мелко-среднезернистыми песчаниками мощностью от 15 до 36 м.

Залежи ботубинского горизонта являются в основном газоконденсатными с нефтяными оторочками. В плане ботубинский горизонт представляет собой песчаную линзу весьма прихотливой формы, вытянутую в северо-восточном направлении, мощность которой меняется от 0 до 28 м. Наибольшие мощности фиксируются в пределах чаяндинской моноклинали, наименьшие – в пределах нижнехамакинской структурной террасы. Глубины залегания горизонта – 1540–1970 м. Горизонт обладает высокими емкостно-фильтрационными свойствами. Пористость его в среднем равна 12–14 % и в отдельных случаях достигает 20 %, проницаемость – $(200–300) \cdot 10^{-3}$ мкм, наиболее высокие значения достигают $2000 \cdot 10^{-3}$. Для залежей характерны anomalно низкие пластовые температуры (9–3,1 °C) и давление (11,97–13,28 МПа). Нефть характеризуется плотностью 0,884 г/см³, вязкостью 11,81 мПа·с, малосмолистостью, малопарафинистостью, малосернистостью.



Верхнечонское нефтегазоконденсатное месторождение общей площадью 2,4 тыс. км² является крупнейшим в Иркутской области и вторым по величине на востоке России. Месторождение относится к Восточно-Сугдинскому нефтегазоносному участку Непско-Ботуобинской нефтегазоносной области Лено-Тунгусской нефтегазоносной провинции. В геоструктурном отношении оно приурочено к северо-западной периклинали Чоно-Пеледуйского поднятия в пределах присводовой части Непско-Ботуобинской антеклизы и связано со сложнопостроенной структурой размером 65×45 км.

Верхнечонское месторождение уникально по степени сложности геологического строения. Это обусловлено сочетанием тектонических нарушений, сопровождавшихся внедрением траппов, высокой минерализацией пластовых вод, резкой изменчивостью фильтрационно-емкостных свойств продуктивных горизонтов по площади и разрезу из-за невыдержанности литологического состава коллекторов, их засоления и полного выклинивания [20].

В геологическом строении месторождения принимают участие отложения рифея, нижнего, среднего и верхнего кембрия и каменноугольной системы, которые со стратиграфическим и угловым несогласием залегают на породах фундамента архей-протерозойского возраста. Общая толщина осадочных отложений изменяется от 1176 до 1729 м, не считая толщины залегающих среди них траппов.

В разрезе осадочной толщи Верхнечонского нефтегазоконденсатного месторождения выявлен ряд промышленно нефтегазоносных и перспективных горизонтов, имеющих доказанную нефтегазоносность и региональное распространение: верхнечонский, преображенский, устькутский, христофоровский и атовский.

Основным объектом промышленной разработки является верхнечонский горизонт, в котором сосредоточены 82 % извлекаемых запасов месторождения, в том числе 72 % запасов категории С₁. Верхнечонский горизонт отличается блоковым строением с высокой степенью неоднородности, гидрофобным засоленным коллектором и низкой пластовой

температурой. Нефть горизонта имеет плотность 0,85 г/см³ и является среднепарафинистой (1,2 масс. % парафина), малосернистой (0,4 масс. % серы), малосмолистой (5,7–7,8 масс. % смолы). Газ – метановый (80–92 %), содержание тяжелых гомологов – до 18–20 %, плотность – 0,667–0,731 г/см³.

Ангаро-Ленская ступень (вендский нефтегазоносный комплекс). Ангаро-Ленская ступень (прогиб) представляет собой моноклинали, ограниченную на востоке и северо-востоке озером Байкал и Байкальской складчатой областью, на севере – Катангской седловиной, на западе и северо-западе – Непско-Ботуобинской антеклизой. Ангаро-Ленская ступень является областью широкого развития терригенно-карбонатных и соленосных пород позднекембрийского и раннепалеозойского возрастов, мощность которых колеблется от 600 до 800 м. Разрез осадочных отложений имеет платформенный характер и представлен породами рифея, венда, кембрия и ордовика. Мощность рифейских отложений составляет 0,3–5,4 км, вендских отложений – 0,4–0,5 км, палеозойских отложений – 2,5 км. Ангаро-Ленская нефтегазоносная область охватывает всю территорию Ангаро-Ленской ступени и юго-западную оконечность Непско-Ботуобинской антеклизы. Площадь ее равняется 170 тыс. км².

Ковыктинское газоконденсатное месторождение является одним из крупнейших в мире и самым крупным месторождением в Восточной Сибири. В тектоническом плане оно расположено на Ангаро-Ленской ступени и приурочено к пологому моноклиальному склону Ковыктинско-Жигаловской структурной террасы, осложненной Ковыктинским структурным носом. Согласно нефтегеологическому районированию, территория месторождения относится к Ангаро-Ленской нефтегазоносной области Лено-Тунгусской нефтегазоносной провинции. Ковыктинская зона газонакопления включает три участка недр: Ковыктинский, Чиканский и Хандинский, которые примыкают друг к другу и по сути приурочены к одной большой неструктурной ловушке.

В геологическом строении района Ковыктинского газоконденсатного месторождения принимают участие породы кристаллического



фундамента протерозойского возраста и осадочные породы нижнего палеозоя. Непосредственно на древнем фундаменте на глубинах 3104–3474 м залегает терригенный комплекс осадков ушаковской свиты (124 м) венда – кембрия и нижнеотской подсвиты (247 м) нижнего кембрия. В разрезе осадочного чехла выделяется три нефтегазоносных комплекса: рифейский карбонатный, вендский терригенный и нижнекембрийский карбонатный. Они вмещают 12 продуктивных горизонтов мощностью от 10 до 100 м (рис. 4). Главным продук-

тивным горизонтом, к которому приурочены основные залежи углеводородов, является парфеновский горизонт венда регионального распространения, занимающий самую верхнюю часть разреза терригенного венда [21].

Горизонт сложен разнотекстурными кварц-полевошпатовыми и кварцевыми косослоистыми песчаниками дельтовых и аллювиальных фаций мощностью 40–80 м. Продуктивными являются пласты П1 и П2 мощностью 14–33 и 38–54 м соответственно.

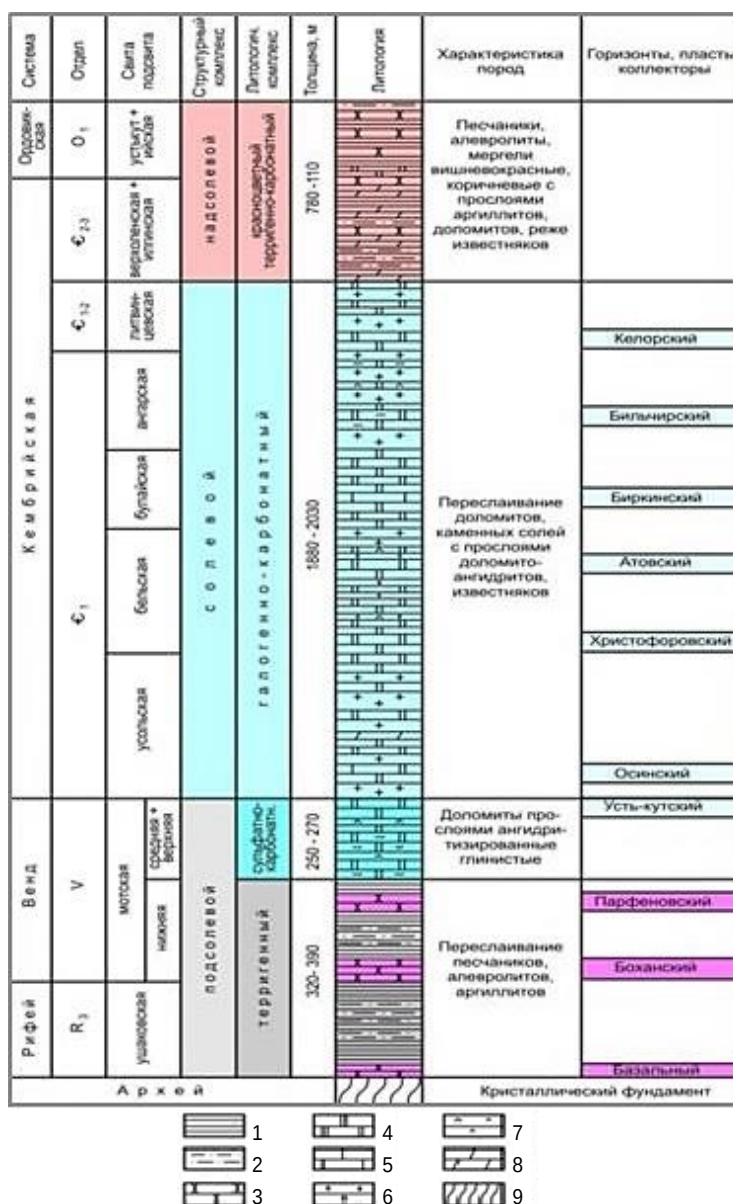


Рис. 4. Сводный стратиграфический разрез месторождений Ковыктинской группы [21]:
1 – аргиллиты; 2 – алевролиты; 3 – песчаники; 4 – доломиты; 5 – известняки; 6 – каменная соль;
7 – ангидриты; 8 – мергели; 9 – кристаллические породы

Fig. 4. Summary stratigraphic section of the Kovvykta group deposits [21]:
1 – mudstones; 2 – siltstones; 3 – sandstones; 4 – dolomites; 5 – limestones; 6 – rock salt;
7 – anhydrites; 8 – marls; 9 – crystalline rocks



Газоконденсатные залежи выявлены в пластах П1 и П2 парфеновского горизонта. Продуктивная часть разреза характеризуется аномальными термобарическими условиями: пластовая температура достигает 57 °С, пластовое давление составляет 24,4–25,9 МПа, что на 4,7 МПа ниже гидростатического. Конденсаты месторождения относятся к типу легких метановых, однако фракционный состав их более обширен (до 300 °С), а углеводородный более богат компонентами. Они содержат керосиновую и дизельную топливные фракции. Конденсаты малосернистые (0,07–0,13 % серы), малосмолистые, малопарафинистые (0,07–0,17 % парафина), плотность их меняется от 686 до 748,3 кг/м³.

Вилъюйская синеклиза и Предверхоанского прогиб – мезозойские газонаосные и газоконденсатные комплексы. Вилъюйская синеклиза территориально занимает в основном бассейн реки Вилъюй. На севере она наложена на Анабаро-Оленекскую антеклизу, на юге – на Среднеленский перикратонный прогиб, а на востоке флексурным перегибом отделена от Предверхоанского краевого прогиба, развитие с которым шло синхронно в течение второй половины юры и в мелу. Нефтегазовые геологические системы этих региональных структур объединяются в Лено-Вилъюйскую нефтегазовую провинцию, в которую включены Лено-Вилъюйская, Приверхоанская и Лено-Анабарская нефтегазовые области. В отличие от месторождений Непско-Ботубинской антеклизы и Предпатомского прогиба, локализующихся в отложениях венда и нижнего кембрия, в Лено-Вилъюйской нефтегазовой провинции продуктивные горизонты известны в верхнепалеозойско-мезозойских отложениях, поэтому в литературе по геологии их разделяют на две нефтегазовые провинции: Лено-Тунгусскую венд-кембрийскую и Лено-Вилъюйскую пермь-мезозойскую [22].

Нефти пермских и триасовых отложений имеют плотность 0,84–0,86 г/см³, являются малосернистыми, малосмолистыми (до 5 % смол) и высокопарафинистыми (до 14 % парафина), доля аренов в них достигает 38 %. Нефти юрских отложений очень тяжелые (0,93 г/см³), малосернистые и малосмолистые, имеют долю аренов до 52 %, что сбли-

жает их с нефтью кембрийских толщ Бахтинского мегавыступа Лено-Тунгусской нефтегазовой провинции.

Газовые конденсаты пермских и триасовых отложений имеют плотность 0,74–0,79 г/см³, преимущественно метановый состав (до 56,2 % метана), доля нафтенных углеводородов в них достигает 47 %, ароматических – 21 %. Газовые конденсаты юрских отложений обладают плотностью 0,83 г/см³ и по составу являются метановыми.

Средневилъюйское газоконденсатное месторождение входит в состав Лено-Вилъюйской нефтегазовой провинции. Открыто месторождение в 1965 г., разрабатывается с 1975 г. В тектоническом отношении оно приурочено к одноименной локальной структуре, осложняющей западный склон Хапчагайского мегавала Вилъюйской синеклизы. Средневилъюйское локальное поднятие представляет собой брахиантклинальную складку субширотного простирания размером 34×22 км и амплитудой около 350 м. Структурные планы поднятия по юрским и нижнетриасовым отложениям совпадают. В пределах Средневилъюйской структуры ярко выраженных дизъюнктивных нарушений не выявлено.

По характеру геологического строения, условиям залегания и степени выдержанности коллекторов продуктивных пластов месторождение является сложным и относится к категории многозалежных. По типу строения ловушки, контролирующей месторождение, характеризуется как пластовое сводовое, по числу продуктивных горизонтов является многопластовым.

Разрез осадочных отложений изучен бурением до глубины 6519 м. Вскрытая его часть снизу вверх представлена верхнепалеозойскими (каменноугольные, пермские), мезозойскими (триасовые, юрские, меловые) и четвертичными отложениями (рис. 5). В разрезе выделяются верхнепермский, нижнетриасовый, среднетриасовый, нижнеюрский и среднеюрско-меловой газогидродинамические комплексы, которые разделены региональными флюидоупорами, преимущественно глинистого состава. Разрез Средневилъюйского месторождения характеризуется большим этажом газонаосности.

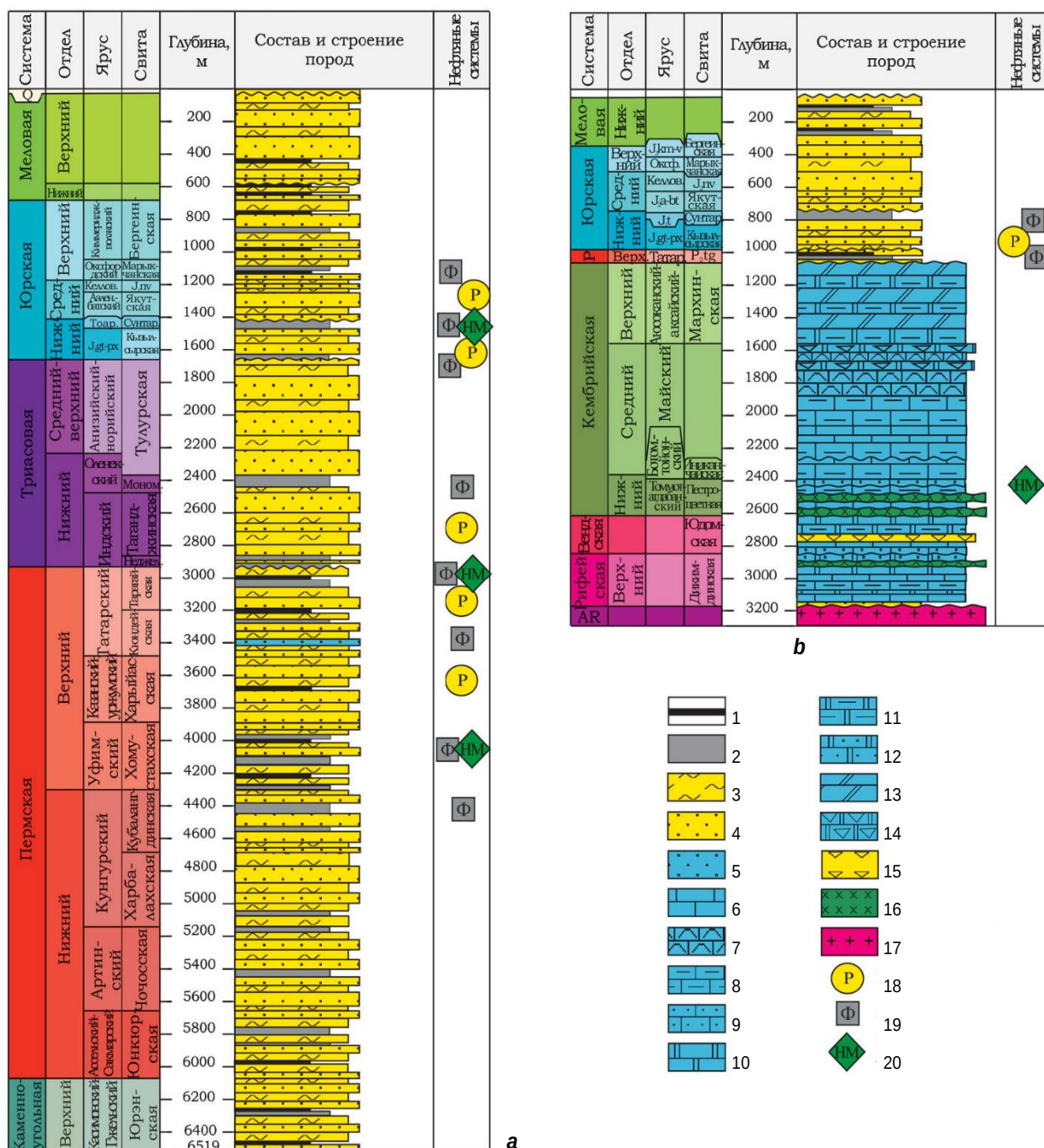


Рис. 5. Литолого-стратиграфическая схема Вилуйской синеклизы по данным бурения скважин Средне-Вилуйской-27 и Баппагайской-1 [22]:

а – центральная часть (Хапчагайский вал), скважина Средне-Вилуйская-27;

б – Южный борт, скважина Баппагайская-1

- 1 – угли; 2 – аргиллиты; 3 – алевролиты; 4 – песчаники; 5 – песчаники известковистые; 6 – песчаники «чистые»; 7 – известняки водорослевые; 8 – известняки глинистые; 9 – известняки песчанистые; 10 – доломиты «чистые»; 11 – доломиты глинистые; 12 – доломиты песчанистые; 13 – мергели доломитовые; 14 – брекчии доломитовых пород; 15 – брекчии терригенных пород; 16 – долериты; 17 – породы кристаллического фундамента; 18 – резервуары; 19 – флюидопоры; 20 – нефтематеринские толщи

Fig. 5. Lithological and stratigraphic diagram of the Vilyui syncline based on drilling data of Sredne-Vilyuyskaya-27 and Bappagayskaya-1 wells [22]

а – central part (Khapchagai swell), Sredne-Vilyuyskaya-27 well; **б** – South wall, Bappagayskaya-1 well

- 1 – coals; 2 – mudstones; 3 – siltstones; 4 – sandstones; 5 – calcareous sandstones; 6 – “clean” sandstones; 7 – algal limestones; 8 – clayey limestones; 9 – sandy limestones; 10 – “clean” dolomites; 11 – clayey dolomites; 12 – sandy dolomites; 13 – dolomite marls; 14 – breccias of dolomitic rocks; 15 – breccias of terrigenous rocks; 16 – dolerites; 17 – rocks of crystalline foundation; 18 – reservoirs; 19 – reservoir cap rocks; 20 – oil source strata



Промышленные притоки газа и газа с конденсатом получены из юрских, триасовых и пермских отложений в интервале глубин от 950 до 2950 м. Глубина залегания продуктивных пластов варьирует от 1430 до 4180 м. Основными продуктивными отложениями являются песчаники нижнего триаса, в котором выделяются горизонты Т1-I, Т1-II, Т1-III, а главным объектом разработки – горизонт Т1-III, с которым связано 97 % запасов газа и конденсата всего месторождения. Продуктивный горизонт Т1-III приурочен к нижней части мономской свиты нижнего триаса, выполняющей роль экрана. Он перекрывается и подстилается аргиллитами и представлен несколькими песчаными пластами, не выдержанными по простиранию [23]. Эффективные толщины горизонта изменяются от 10 до 50 м, среднее значение коэффициента открытой пористости составляет 20 %, коэффициента газонасыщенности – 65 %. Содержание стабильного конденсата – 60 г/м³. Плотность газа – 585–657 кг/м³. Состав газа: CH₄ – 90,6–95,3 %; N₂ – 0,5–0,85 %; CO₂ – 0,3–1,3 %.

*Енисей-Хатангский, Анабаро-Хатангский и Лено-Анабарский прогибы (мезозойские нефтегазоносные комплексы)*⁷. Енисей-Хатангский нефтегазоносный бассейн, охватывающий одноименный региональный прогиб, расположен в западной половине Таймырской низменности и ограничен двумя плато: Бырранга на севере и Путорано на юге. Прогиб разделяет Сибирскую платформу и Таймырскую складчатую область и одновременно является составной частью зоны мезозойско-кайнозойских депрессий, протягивающейся от Западно-Сибирской геосинеклизы через Анабаро-Хатангскую седловину до Вилуйской гемисинеклизы.

С позиции тектоники плит Енисей-Хатангский нефтегазоносный бассейн рассматривается как структура, сформированная над внутриконтинентальной рифтовой системой доюрского возраста. Это доказывается большой мощностью осадочного чехла (8–14 км в центре и 5–6 км по бортам), общим утонением литосферы под прогибом с подъемом поверхности Мохоровичича, а также градиентным ха-

рактером строения потенциальных геофизических полей, связанных, по всей вероятности, с развитием ультраосновных интрузий.

Мезозойские нефтегазоносные комплексы Енисей-Хатангского, Анабаро-Хатангского и Лено-Анабарского прогибов отличаются от пермско-мезозойских комплексов Вилуйской синеклизы и Предверхожанского прогиба структурным положением. Все они приурочены к крупной региональной геологической системе – мезозойскому Енисей-Хатангскому палеорифту.

По литологическому составу разрезы палеорифта близки осадочным комплексам Западно-Сибирской плиты (западная часть палеорифта) и разрезу Вилуйской синеклизы (восточный фланг палеорифта). В частности, значительные залежи углеводородов восточного фланга залегают не только в отложениях мезозоя, но и в пермских отложениях палеозоя (Южно-Тягинское месторождение нефти и другие).

Осадочный чехол Енисей-Хатангского регионального прогиба представлен преимущественно карбонатными и терригенными отложениями рифея, венда, нижнего и верхнего палеозоя, триаса, юры и мела общей мощностью 12 км (рис. 6) [24].

В нефтегазоносном отношении Енисей-Хатангский региональный прогиб входит в состав одноименной нефтегазоносной области Лено-Тунгусской нефтегазоносной провинции. В пределах открыто 17 месторождений нефти и газа. Большая часть залежей углеводородов сконцентрирована в нижнемеловых отложениях, два месторождения связаны с верхнемеловыми отложениями, три приурочены к юре. Большинство месторождений газовые и газоконденсатные. Наиболее изученными и перспективными на поиски углеводородов являются субаквальные отложения юрско-мелового комплекса, в составе которого выделено девять региональных (субрегиональных) и зональных резервуаров: шесть – в юрских, две – в нижнемеловых и один – в верхнемеловых отложениях, перекрытых флюидоупорами [25].

⁷ Анабаро-Хатангскую седловину условно рассматривают в составе Енисей-Хатангского прогиба.

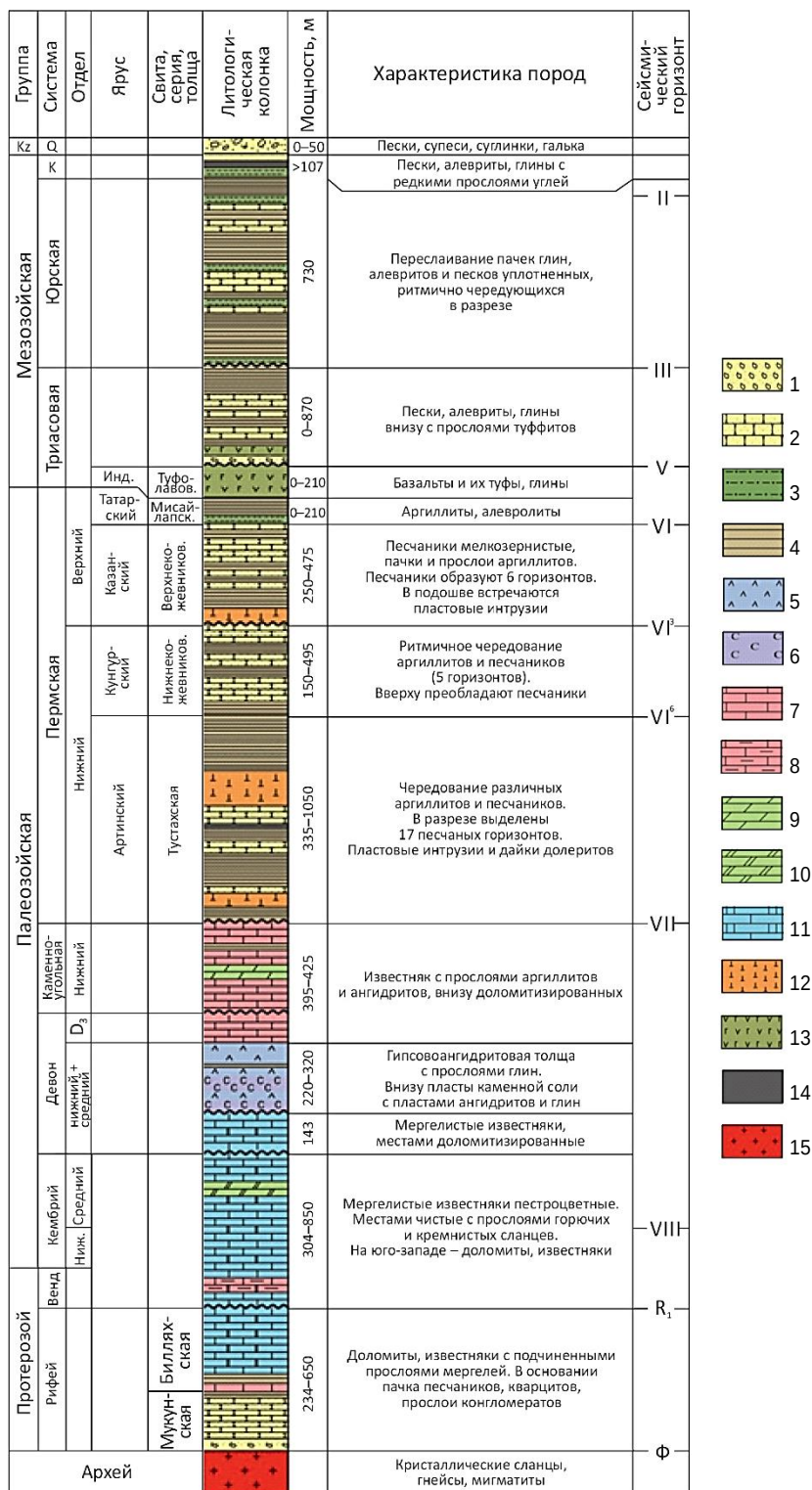


Рис. 6. Сводный литолого-стратиграфический разрез Анабаро-Хатангской седловины по материалам бурения [25]:

1 – пески, гравелиты; 2 – песчаник; 3 – алевролит; 4 – аргиллит; 5 – ангидрит, гипс; 6 – соль; 7 – известняк; 8 – известняк глинистый; 9 – мергель; 10 – мергель доломитовый; 11 – известняк мергелистый, доломитизированный; 12 – пластовые интрузии и дайки долеритов; 13 – базальты, туффы; 14 – уголь; 15 – кристаллические сланцы, гнейсы, мигматиты

Fig. 6. Summary lithological and stratigraphic section of the Anabar-Khatanga saddle based on drilling materials [25]:

1 – sands, gravelstones; 2 – sandstone; 3 – siltstone; 4 – mudstone; 5 – anhydrite, gypsum; 6 – salt; 7 – limestone; 8 – clayey limestone; 9 – marl; 10 – dolomitic marl; 11 – dolomitic marl limestone; 12 – sills and dolerite dikes; 13 – basalts, tuffites; 14 – coal; 15 – crystalline schists, gneisses, migmatites



Месторождения нефти и газа Енисей-Хатангского прогиба отличаются многопластовостью, сложным блоковым строением залежей, обусловленным многочисленными разрывными нарушениями по всему разрезу, и многофазовым состоянием залежей [26]. Разрывные нарушения в основном представлены сбросами, характеризующимися либо серией ступенчатых разрывов, либо сложнопостроенной полосой крупных трещин.

Мессояхское газовое месторождение (Восточно-Мессояхское и Западно-Мессояхское) считается предельно сложным для промышленного освоения. Научная и практическая значимость Мессояхского месторождения определяется следующим:

- это самое северное из разрабатываемых нефтяных месторождений в России;

- на фоне таких гигантов, как Уренгойское, Самотлорское, Медвежье, Мессояхское месторождение с запасами около 24 млрд м³, утвержденными Государственной комиссией по запасам, можно назвать карликом, но именно оно сыграло роль мощного катализатора в исследовании природных газогидратов в мире;

- Мессояхское месторождение было одним из первых месторождений, в которых был накоплен серьезный опыт промышленной разработки газогидратных залежей [26, 27].

В тектоническом плане Мессояхское месторождение относится к одноименной локальной структуре, осложняющей сводовую часть Танамско-Малохетского мегавала Енисей-Хатангского регионального прогиба. В нижнемеловых отложениях эта структура представляет собой брахиантиклиналь субширокого простирания размерами 18×10 км с амплитудой 100 м [27].

Геологический разрез месторождения сложен песчано-глинистыми отложениями среднеюрского, ниже- и верхнемелового, палеоценового возраста, перекрытыми четвертичными осадками (рис. 7).

Продуктивная толща представлена алевролитовыми породами с прослоями глин и известковистых песчаников. Выявленная залежь приурочена к сложнопостроенной толще в кровле резервуара, которая делится на две части. Верхняя сложена частым переслаива-

нием алевроито-глинистых и песчанистых пород, которые в пределах ловушки меняют мощность от 15 до 74 м. Нижняя часть толщи сложена преимущественно песчаниками и песками, продуктивная мощность которых достигает 56 м. По типу ловушки залежь относится к массивным, сводовым. Проведенные исследования показали, что вверху залежи часть газа находится в виде гидрата, а ниже лежащая, подстилающая ее часть содержит газ в свободном состоянии. Коэффициент открытой пористости коллекторов изменяется в пределах 16–38 % при средней величине в 25,5 % [27]. Максимальный дебит газа из залежи составил 179 тыс. м³/сут. Вместе с газом в небольшом количестве получена нефть плотностью 0,93 г/см³. По составу газ сухой метановый (содержание CH₄ – 99 %).

Результаты исследования и их обсуждение

На основе вышеизложенного можно утверждать следующее:

1. Флюидодинамические процессы при всех возможных вариантах онтогенеза углеводородов играют ключевую роль в образовании залежей нефти и газа.

2. Геофлюидодинамическая система, как и любая другая система – объект крайне неустойчивый, изменяющийся во времени и пространстве, но имеющий свое достаточно равновесное вещественное выражение – нефтегазоносный комплекс.

3. Нефтегазоносные комплексы, выделение которых является результатом комплексирования геологических, геохимических и геофизических исследований, служат вещественным выражением геофлюидодинамических систем разного возраста и распространены по всему стратиграфическому разрезу, а также по всей площади Сибирской платформы.

4. Литологический состав нефтегазоносных комплексов самый разнообразный, но преобладают в нем терригенные и карбонатные породы.

5. На Сибирской платформе выделены возможные очаги генерации углеводородов и возможные направления миграции флюидов.

6. Нефти разрезов месторождений разных

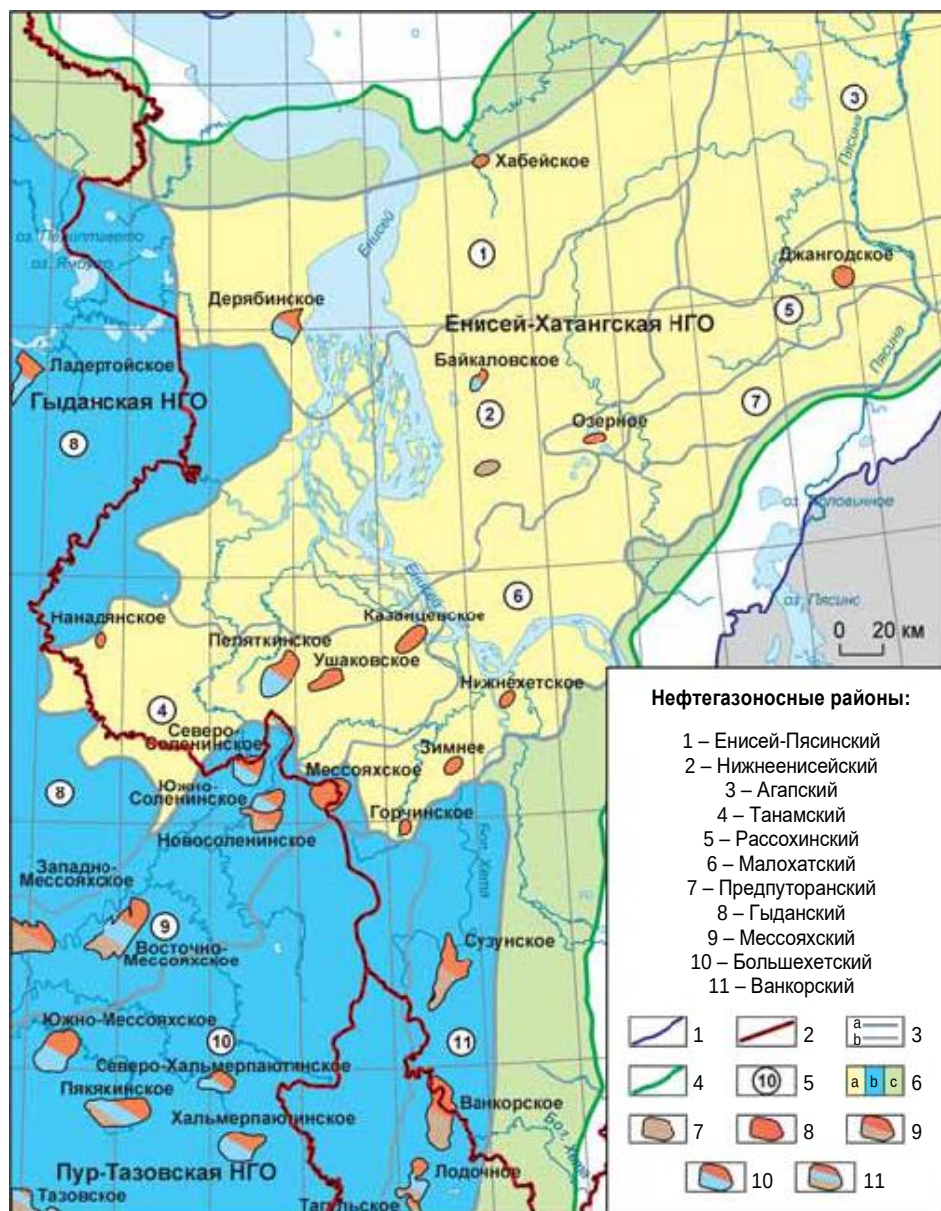


Рис. 7. Схема нефтегазогеологического районирования Енисей-Хатангского регионального прогиба [28]:

1 – граница мезозойско-кайнозойского осадочного чехла; 2 – административные границы; 3 – границы нефтегазоносных областей (а) и нефтегазоносных районов (б); 4 – границы перспективных земель; 5 – номера нефтегазоносных районов; 6 – перспективные земли: а – нефтегазоносные районы Хатангско-Вилуйской нефтегазоносной провинции, б – нефтегазоносные районы Западно-Сибирской нефтегазоносной провинции, с – нефтегазоносные районы Лено-Тунгусской провинции; 7–11 – месторождения углеводородов: 7 – нефтяные, 8 – газовые, 9 – газонефтяные, 10 – газоконденсатные, 11 – нефтегазоконденсатные

Fig. 7. Diagram of the oil and gas geological zoning of the Yenisei-Khatanga regional trough [28]:

1 – boundary of the Mesozoic-Cenozoic sedimentary cover; 2 – administrative boundaries; 3 – boundaries of oil and gas bearing areas (a) and oil and gas bearing districts (b); 4 – boundaries of promising lands; 5 – numbers of oil and gas bearing districts; 6 – promising lands: a – oil and gas bearing districts of Khatanga-Vilyuyskaya oil and gas bearing province, b – oil and gas bearing districts of West Siberian oil and gas bearing province, c – oil and gas bearing districts of Lena-Tunguska province; 7–11 – hydrocarbon deposits: 7 – oil, 8 – gas, 9 – gas-oil, 10 – gas condensate, 11 – oil-gas condensate

возрастных комплексов значительно отличаются по составу и плотности: протерозойские нефти по составу нефтено-метановые, в основном легкие и средние (0,8–0,86 г/см³), малосернистые (0,1–0,28 %), содержание смол в них – 0,8–14,4 % (до 27 % в Юрубчено-

Тохомской зоне), парафинов – 0,3–3,3 %. Нефть из отложений рифея и венда нефтено-метанового типа имеет плотность 0,8–0,86 г/см³, малосернистая (0,1–0,28 % серы), смол содержит в интервале от 0,8–14,28 масс. %, парафинов – 0,3–3,3 масс. %. Плотность



нефти терригенных вендско-нижнекембрийских отложений изменяется от 0,8 до 0,88 г/см³, нефть содержит повышенные количества серы (0,28–1 масс. %) и смол (до 15,5 масс. %). Нефти карбонатных вендско-нижнекембрийских отложений (осинский горизонт) имеют плотность 0,8–0,9 г/см³, доля серы в них составляет 0,1–1,4 масс. %, смол – 1–24 масс. %, отмечено наименьшее количество метаново-нафтеновых углеводородов (61–63 масс. %) [17]. В то же время «по имеющимся многочисленным данным, нефти Сибирской платформы относятся к единому генетическому типу, для которого характерно преобладание метановых углеводородов. Один из важных признаков углеводородного состава – преобладание изоалканов над алканами, повышенное содержание фитана». Тем не менее последнее утверждение представляется спорным, так как на территории Сибирской платформы следует учитывать наличие нескольких нефтегазоносных провинций [29].

Заключение

Нефтегазоносные комплексы представляют собой подразделения высокого ранга в разрезах нефтегазоносных бассейнов Сибирской платформы и выделены во всех основных стратиграфических подразделениях геологической шкалы. Если принять за данность, что они являются вещественным выражением природных геофлюидодинамических систем разного возраста, то можно предполагать, что последние существовали на протяжении всей геологической истории существования Земли, но их самореализация проходила в условиях наиболее благоприятного сочетания глобальных общепланетарных факторов – климатических, геоструктурных и геохимических. Реальным подтверждением существования геофлюидодинамических систем служат многочисленные месторождения углеводородов разнообразного фазового состояния и разного возраста.

Список источников

1. Соколов Б. А., Абля Э. А. Флюидодинамическая модель нефтегазообразования. М.: Геос, 1999. 76 с.
2. Запивалов Н. П., Попов И. П. Флюидодинамические модели залежей нефти и газа. Новосибирск: Гео, 2003. 195 с.
3. Скачек К. Г., Ларичев А. И., Бостриков О. И., Гриценко С. А., Видик С. В. Флюидодинамическое моделирование в нижних горизонтах осадочного чехла Среднеобской нефтегазоносной области Западной Сибири // Нефтегазовая геология. Теория и практика. 2010. Т. 5. № 2. [Электронный ресурс]. URL: https://www.ngtp.ru/rub/6/19_2010.pdf (18.08.2022).
4. Magoon L. B., Dow W. G. The petroleum system – from source to trap. Richardson: American Association of Petroleum Engineers, 2012. 644 p.
5. Pang X-Q., Jia C-Z., Wang W-Y. Petroleum geology features and research developments of hydrocarbon accumulation in deep petroliferous basins // Petroleum Science. 2015. Vol. 12. P. 1–53. <https://doi.org/10.1007/s12182-015-0014-0>.
6. Хаин В. Е., Соколов Б. А., Марасанова Н. В. Геофлюидодинамический фактор в тектонике и нефтегазоносности осадочных бассейнов // Геология нефти и газа. 1988. № 1. С. 60–62.
7. Соболев П. Н., Шиганова О. В., Дыхан С. В. Перспективы увеличения нефтегазового потенциала докембрийских отложений Лено-Тунгусской провинции // Геология нефти и газа. 2009. № 6. С. 62–71.
8. Трофимук А. А., Молчанов В. И., Параев В. В. Особенности геодинамических обстановок формирования гигантских месторождений нефти и газа // Геология и геофизика. 1998. Т. 39. № 5. С. 673–682.
9. Конторович А. Э. Общая теория нафтидогенеза // Базисные концепции, пути построения. Теоретические и региональные проблемы теории нефти и газа. Новосибирск: Наука, 1991. С. 29–44.
10. Дробот Д. И., Пак В. А., Деятеликов Н. М., Хохлов Г. А., Карпышев А. В., Бердников И. Н. Нефтегазоносность докембрийских отложений Сибирской платформы, перспективы подготовки и освоения их углеводородного потенциала // Геология и геофизика. 2004. Т. 45. № 1. С. 110–120.
11. Ступакова А. В., Хведчук И. И., Сауткин Р. С., Коробова Н. И., Сивкова Е. Д. Переформирование залежей в древних нефтегазоносных бассейнах (на примере залежей восточного склона Байкитской антеклизы Сибирской платформы) // Георесурсы. 2019. Т. 21. № 2. С. 31–41. <https://doi.org/10.18599/grs.2019.2.31-41>.
12. Трофимук А. А. Куюмбо-Юрубчено-Тайгинское газонефтяное месторождение – супергигант Красноярского края: основы технико-экономического обоснования разработки. Новосибирск: Изд-во ОИГГМ, 1992. 59 с.
13. Харахинов В. В., Шленкин С. И., Зеренинов В. А., Рябенко В. Н., Зоценко Н. А. Нефтегазоносность докембрийских толщ Куюмбинско-Юрубчено-Тохомского ареала нефтегазонакопления // Нефтегазовая геология. Теория и практика. 2011. Т. 6. № 1. [Электронный ресурс]. URL: https://www.ngtp.ru/rub/4/12_2011.pdf (18.08.2022).
14. Мельников Н. В., Смирнов Е. В., Масленников М. А., Процко А. Н., Боровикова Л. В. Геологические предпосылки прироста минерально-сырьевой базы



Юрубчено-Куюмбинского центра нефтедобычи // Геология и геофизика. 2017. Т. 58. № 3-4. С. 586–601. <https://doi.org/10.15372/GIG20170321>.

15. Ситников В. С., Павлова К. А., Севостьянова Р. Ф. Перспективы нефтеносности центральных районов Западной Якутии // Геология нефти и газа. 2018. № 6. С. 63–72. <https://doi.org/10.31087/0016-7894-2018-6-63-72>.

16. Дыхан С. В. Поверхностные газогеохимические поля над залежами углеводородов Собинского месторождения // Дегазация Земли – геодинамика, геофлюиды, нефть и газ: материалы Междунар. конф. памяти акад. П. Н. Кропоткина (Москва, 20–24 мая 2002 г.). М.: Геос, 2002. С. 322–325.

17. Мельников Н. В. Нефтегазоносные комплексы Лено-Тунгусской провинции // Геология и геофизика. 1996. Т. 37. № 8. С. 196–205.

18. Иванова И. К., Чалая О. Н., Каширцев В. А. Палеотемпературные условия формирования газоконденсатных систем на востоке Сибирской платформы // Наука и образование. 2003. № 3. С. 50–52.

19. Рыжов А. Е., Крикунов А. И., Рыжова Л. А., Канунникова Н. Ю. Уточнение геологической модели Чаяндинского нефтегазоконденсатного месторождения // Вести газовой науки. 2011. № 1. С. 132–145.

20. Рапацкая Л. А. Влияние особенностей геологического строения Верхнечонского нефтегазоконденсатного месторождения на систему его разработки и эксплуатации. *Науки о Земле и недропользование*. 2020. Т. 43. № 3. С. 350–363. <https://doi.org/10.21285/2686-9993-2020-43-3-350-363>.

21. Юрова М. П., Томилова Н. Н. Разломно-блоковые модели залежей углеводородов Мирнинского свода Непско-Ботуобинской антеклизы // Вести газовой науки. 2012. № 1. С. 139–147.

22. Фролов С. В., Карнющина Е. Е., Коробова Н. И., Бакай Е. А., Курдина Н. С., Крылов О. В. [и др.]. Особенности строения, осадочные комплексы и углеводородные системы Лено-Вилуйского нефтегазоносного бассейна // Георесурсы. 2019. Т. 21. № 2. С. 13–30. <https://doi.org/10.18599/grs.2019.2.13-30>.

23. Сафронов А. Ф., Сивцев А. И., Черненко В. Б. Нефтегазоносность нижнемезозойских отложений Хапчайского мегавала Вилуйской синеклизы // Геология и геофизика. 2014. Т. 55. № 8. С. 1263–1269.

24. Афанасенков А. П., Обухов А. Н., Чикишев А. А., Шайдаков В. А., Бордюг А. В., Каламбаров С. Л. Тектоника северного обрамления Сибирской платформы по результатам комплексного анализа геолого-геофизических данных // Геология нефти и газа. 2018. № 1. С. 7–27.

25. Дмитриевский А. Н., Еремин Н. А., Шабалин Н. А. Сейсмологическая характеристика разреза осадочного чехла арктической зоны Сибирской платформы // Геология нефти и газа. 2018. № 1. С. 29–47.

26. Адзынова Ф. А., Сухоносенко А. Л. Мессояхское газогидратное месторождение // Газохимия. 2010. № 11. С. 38–40.

27. Макогон Ю. Ф., Омельченко Р. Ю. Мессояха – газогидратная залежь, роль и значение // Геология и полезные ископаемые Мирового океана. 2012. № 3. С. 5–19.

28. Конторович В. А. Тектоника и нефтегазоносность западной части Енисей-Хатангского регионального прогиба // Геология и геофизика. 2011. Т. 52. № 8. С. 1027–1050.

29. Парфёнова Н. М., Косякова Л. С., Григорьев Е. Б., Шафиев И. М., Логинов В. А., Наренков Р. Ю. [и др.]. Нефтяной потенциал Лено-Тунгусской нефтегазоносной провинции // Вести газовой науки. 2021. № 2. С. 63–80.

References

1. Sokolov B. A., Ablya E. A. *Fluid dynamic model of oil and gas formation*. Moscow: Geos; 1999. 76 p. (In Russ.).

2. Zapivalov N. P., Popov I. P. *Fluid dynamic models of oil and gas fields*. Novosibirsk: Geo; 2003. 195 p. (In Russ.).

3. Skachek K. G., Larichev A. I., Bostrikov O. I., Gritsenko S. A., Vidik S. V. Fluid-dynamic simulation in the sedimentary cover lower horizons of the Sredneob petroleum region, Western Siberia. *Neftegazovaya geologiya. Teoriya i praktika = Petroleum Geology – Theoretical and Applied Studies*. 2010;5(2). Available from: https://www.ngtp.ru/rub/6/19_2010.pdf [Accessed 18th August 2022]. (In Russ.).

4. Magoon L. B., Dow W. G. *The petroleum system – from source to trap*. Richardson: American Association of Petroleum Engineers; 2012. 644 p.

5. Pang X-Q., Jia C-Z., Wang W-Y. Petroleum geology features and research developments of hydrocarbon accumulation in deep petroliferous basins. *Petroleum Science*. 2015;12:1-53. <https://doi.org/10.1007/s12182-015-0014-0>.

6. Khain V. E., Sokolov B. A., Marasanova N. V. Geofluid dynamic factor in sedimentary basin tectonics and

oil and gas content. *Geologiya nefi i gaza = Russian Oil and Gas Geology*. 1988;1:60-62. (In Russ.).

7. Sobolev P. N., Shyganova O. V., Dykhan S. V. Prospects of increase in oil and gas potential of pre-cambrian deposits of Leno-Tungus province. *Geologiya nefi i gaza = Russian Oil and Gas Geology*. 2009;6:62-71. (In Russ.).

8. Trofimuk A. A., Molchanov V. I., Paraev V. V. Peculiarities of geodynamic settings of formation of gigantic petroleum deposits. *Geologiya i geofizika*. 1998;39(5):673-682. (In Russ.).

9. Kontorovich A. E. General theory of naphthidogenesis. In: *Bazisnye kontseptsii, puti postroeniya. Teoreticheskie i regionalnye problemy teorii nefi i gaza = Basic concepts, construction ways. Theoretical and regional problems of oil and gas theory*. Novosibirsk: Nauka; 1991. p. 29–44. (In Russ.).

10. Drobot D. I., Pak V. A., Devyatilov N. M., Khokhlov G. A., Karpyshev A. V., Berdnikov I. N. Oil and gas potential of Precambrian deposits of the Siberian platform, prospects of their hydrocarbon potential preparation and development. *Geologiya i geofizika*. 2004;45(1):110-120. (In Russ.).



11. Stoupakova A.V., Khvedchuk I.I., Sautkin R.S., Korobova N.I., Sivkova E.D. Reforming of deposits in ancient oil and gas basins (on the example of deposits of the Baikite Anticline eastern slope of the Siberian Platform). *Georesursy*. 2019;21(2):31-41. <https://doi.org/10.18599/grs.2019.2.31-41>.
12. Trofimuk A. A. *Kuyumbo-Yurubcheno-Taiga gas and oil field as a supergiant of the Krasnoyarsk Territory: fundamentals of the feasibility study of the development*. Novosibirsk: United Institute of Geology, Geophysics and Mineralogy; 1992. 59 p. (In Russ.).
13. Kharakhinov V. V., Shlenkin S. I., Zereninov V. A., Ryabchenko V. N., Zoschenko N. A. Petroleum potential of Precambrian strata of Kuyuminskoyurubcheno-Tokhomsky oil and gas accumulation area. *Neftegazovaya geologiya. Teoriya i praktika = Petroleum Geology – Theoretical and Applied Studies*. 2011;6(1). Available from: https://www.ngtp.ru/rub/4/12_2011.pdf [Accessed 18th August 2022]. (In Russ.).
14. Mel'nikov N. V., Smirnov E. V., Maslennikov M. A., Protsko A. N., Borovikova L. V. Geologic prerequisites for increment of the mineral resources base of the Yurubchen-Kuyumba petroleum production center. *Geologiya i geofizika*. 2017;58(3-4):586-601. (In Russ.). <https://doi.org/10.15372/GiG20170321>.
15. Sitnikov V. S., Pavlova K. A., Sevost'yanova R. F. Oil potential of the central part of the Western Yakutia. *Geologiya nefiti i gaza = Russian Oil and Gas Geology*. 2018;6:63-72. (In Russ.). <https://doi.org/10.31087/0016-7894-2018-6-63-72>.
16. Dykhan S. V. Surface gas-geochemical fields over the Sobinsky hydrocarbon deposits. In: *Degazatsiya Zemli – geodinamika, geoflyuidy, nefit' i gaz: materialy Mezhdunar. konf. pamyati akad. P. N. Kropotkina = Degassing of the Earth – geodynamics, geofluids, oil and gas: proceedings of the international conference in memory of the Academician P. N. Kropotki*. 20–24 May 2002, Moscow. Moscow: Geos; 2002, p. 322–325. (In Russ.).
17. Mel'nikov N. V. Oil and gas bearing complexes of the Lena-Tunguska province. *Geologiya i geofizika*. 1996;37(8):196-205. (In Russ.).
18. Ivanova I. K., Chalaya O. N., Kashirtsev V. A. Paleotemperature formation conditions of gas condensate systems in the east of the Siberian platform. *Nauka i obrazovanie*. 2003;3:50-52. (In Russ.).
19. Ryzhov A. E., Krikunov A. I., Ryzhova L. A., Kanunnikova N. Yu. Refining the geological model of the Chayandinsky oil and gas condensate field. *Vesti gazovoi nauki*. 2011;1:132-145. (In Russ.).
20. Rapatskaya L. A. The features of the geological structure of the Verkhnechonsky oil and gas condensate field and their influence on the field development and operation system. *Nauki o Zemle i nedropol'zovanie = Earth sciences and subsoil use*. 2020;43(3):350-363. (In Russ.). <https://doi.org/10.21285/2686-9993-2020-43-3-350-363>.
21. Yurova M. P., Tomilova N. N. Fault-block models of hydrocarbon deposits of the Mirny arch of the Nepa-Bot-uoba anticline. *Vesti gazovoi nauki*. 2012;1:139-147. (In Russ.).
22. Frolov S. V., Karnyushina E. E., Korobova N. I., Bakay E. A., Kurdina N. S., Krylov O. V., et al. Features of the structure, sedimentary complexes and hydrocarbon systems of the Leno-Vilyuisky oil and gas basin. *Georesursy = Georesources*. 2019;21(2):13-30. (In Russ.). <https://doi.org/10.18599/grs.2019.2.13-30>.
23. Safronov A. F., Sivtsev A. I., Chernenko V. B. Oil potential of the lower Mesozoic deposits of the Khapchagai megaswell of the Vilyui syncline. *Geologiya i geofizika*. 2014;55(8):1263-1269. (In Russ.).
24. Afanasenkov A. P., Obukhov A. N., Chikishev A. A., Shaydakov V. A., Bordyug A. V., Kalamkarov S. L. Tectonic setting of the northern surroundings of the Siberian platform based on the integrated study of geological and geophysical data. *Geologiya nefiti i gaza = Russian Oil and Gas Geology*. 2018;1:7-27. (In Russ.).
25. Dmitrievsky A. N., Eremin N. A., Shabalin N. A. The seismic behaviour of the sedimentary cover section in the arctic zone of the Siberian platform. *Geologiya nefiti i gaza = Russian Oil and Gas Geology*. 2018;1:29-47. (In Russ.).
26. Adzynova F. A., Sukhonosenko A. L. Messoyakha gas hydrate field. *Gazokhimiya*. 2010;11:38-40. (In Russ.).
27. Makogon Yu. F., Omel'chenko R. Yu. Messoyakha – gas hydrate deposit, its role and significance. *Geologiya i poleznye iskopaemye Mirovogo okeana*. 2012;3:5-19. (In Russ.).
28. Kontorovich V. A. The tectonic framework and petroleum prospects of the western Yenisei-Khatanga regional trough. *Geologiya i geofizika*. 2011;52(8):1027-1050. (In Russ.).
29. Parfenova N. M., Kosyakova L. S., Grigoryev E. B., Shafiev I. M., Loginov V. A., Narenkov R. Yu., et al. Petroleum potential of Lena-Tunguska oil-gas-bearing province. *Vesti gazovoi nauki*. 2021;2:63-80. (In Russ.).

Информация об авторе / Information about the author



Рапацкая Лариса Александровна,
кандидат геолого-минералогических наук, доцент,
профессор кафедры прикладной геологии,
геофизики и геоинформационных систем,
Институт недропользования,
Иркутский национальный исследовательский технический университет,
г. Иркутск, Россия,
raplarisa@yandex.ru.

**Larisa A. Rapatskaya,**

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

Вклад автора / Contribution of the author

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

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

Конфликт интересов / Conflict of interests

Автор заявляет об отсутствии конфликта интересов.

The author declares no conflicts of interests.

Автор прочитал и одобрил окончательный вариант рукописи.

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

Информация о статье / Information about the article

Статья поступила в редакцию 13.09.2022; одобрена после рецензирования 19.10.2022; принята к публикации 16.11.2022.

The article was submitted 13.09.2022; approved after reviewing 19.10.2022; accepted for publication 16.11.2022.



Научная статья

УДК 550.83.016

<https://doi.org/10.21285/2686-9993-2022-45-4-367-379>



Петрофизическое обоснование возможности восстановления упруго-скоростных характеристик геологического разреза на основе данных электромагнитных зондирований

Иван Антонович Шелохов^a, Александр Валентинович Поспеев^b,
Игорь Владимирович Буддо^c

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

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

^{a,c}Научный центр изучения Арктики, г. Салехард, Россия

Автор, ответственный за переписку: Шелохов Иван Антонович, sia@crust.irk.ru

Резюме. Геологический разрез Восточной и Западной Сибири (Россия) является крайне сложным объектом для изучения сейсморазведкой. Исследования, представленные в данной работе, были направлены на изучение петрофизической взаимосвязи между удельным электрическим сопротивлением и скоростью продольной волны как основы для прогнозирования скоростной модели верхней части разреза на базе данных нестационарных электромагнитных зондирований. Путем численного моделирования петрофизических зависимостей были рассчитаны кривые зависимости удельного электрического сопротивления от скорости продольной волны. Полученные результаты математического моделирования и полевых экспериментов подтверждают эффективность предложенной методики, позволяющей повысить точность восстановления геологической модели и достоверность прогноза. На основе полученных зависимостей были сделаны выводы о том, в каких геологических условиях возможен уверенный переход от геоэлектрических характеристик разреза к скоростным. Показано, что с применением предложенной технологии возможно надежное восстановление скоростной модели верхней части разреза. Использование разработанной методики позволяет при минимальных затратах повысить качество обработки данных сейсморазведки и увеличить точность картирования границ геологического разреза исходя из характера решаемой задачи.

Ключевые слова: электроразведка, петрофизическое моделирование, удельное электрическое сопротивление, скорость продольной волны, многолетнемерзлые породы, Западная Сибирь, Арктика

Финансирование: Исследование выполнено за счет гранта Российского научного фонда № 22-17-20009 (<https://rscf.ru/project/22-17-20009/>). Проект № 22-17-20009 «Современные методы геофизических исследований для разработки и научного обоснования подходов к изучению внутреннего строения криолитозоны и поверхностных криогенных форм рельефа Арктики и их возможной связи с флюидодинамическими процессами» реализуется при поддержке Правительства Ямало-Ненецкого автономного округа.

Для цитирования: Шелохов И. А., Поспеев А. В., Буддо И. В. Петрофизическое обоснование возможности восстановления упруго-скоростных характеристик геологического разреза на основе данных электромагнитных зондирований // Науки о Земле и недропользование. 2022. Т. 45. № 4. С. 367–379. <https://doi.org/10.21285/2686-9993-2022-45-4-367-379>.

Original article

Petrophysical substantiation of geological section elastic-velocity property recovery potential based on TEM data

Ivan A. Shelokhov^a, Alexander V. Pospeev^b, Igor V. Buddo^c

^{a,c}Institute of the Earth's Crust SB RAS, Irkutsk, Russia

^cIrkutsk National Research Technical University, Irkutsk, Russia

^cScientific Center for the Study of the Arctic, Salekhard, Russia

Corresponding author: Ivan A. Shelokhov, sia@crust.irk.ru

Abstract. The geological section of Eastern and Western Siberia (Russia) is a very complicated object for seismic exploration. The research presented in the article is aimed at studying a petrophysical relation between electrical resistivity and



P-wave velocity, as a basis for predicting the velocity model of the upper part of the section based on TEM sounding. Having performed a numerical modeling of petrophysical function, the authors calculated the dependency curves of electrical resistivity on the P-wave velocity. The obtained results of mathematical modeling and field experiments have proved the effectiveness of the proposed methodology as it increases the accuracy of geological model construction and enhances prediction reliability. Based on the dependences obtained, conclusions were drawn about the geological conditions favorable for a steady transition of section geoelectric characteristics to the velocity ones. The proposed technology is shown to provide a reliable reconstruction of the velocity model of the upper part of the section. The use of the developed methodology allows to improve the quality of seismic data processing and increase the accuracy of geological section boundary mapping at minimum cost based on the nature of the problem under investigation.

Keywords: electrical prospecting, petrophysical modeling, electrical resistivity, P-wave velocity, permafrost, Western Siberia, Arctic

Funding: The study is funded by the Russian Science Foundation grant No. 22-17-20009 (<https://rscf.ru/project/22-17-20009/>). Project No. 22-17-20009 "Modern geophysical methods for the development and scientific substantiation of approaches to the study of the internal structure of the permafrost zone, Arctic surface cryogenic reliefs and their possible connection with fluid dynamic processes". The project is implemented with the support of the Government of the Yamalo-Nenets Autonomous Okrug.

For citation: Shelokhov I. A., Pospeev A. V., Buddo I. V. Petrophysical substantiation of geological section elastic-velocity property recovery potential based on TEM data. *Nauki o Zemle i nedropol'zovanie = Earth sciences and subsoil use*. 2022;45(4):367-379. (In Russ.). <https://doi.org/10.21285/2686-9993-2022-45-4-367-379>.

Введение

Современные сейсмические исследования для разведки нефти и газа не всегда позволяют получить достоверную информацию о скоростных характеристиках верхней части разреза ввиду особенностей приема сигнала и параметров возбуждения. Данный фактор напрямую влияет на качество конечной геологической модели месторождений, которые находятся в сложных поверхностных условиях. В рамках этого существует необходимость привлечения внешних источников информации о верхней части разреза там, где одних сейсмических исследований недостаточно¹ [1–5].

При интерпретации сейсмических данных для районов со сложными поверхностными условиями и неоднородным рельефом необходимо учитывать влияние этой особенности. Источником такого влияния являются аномалии скорости, сосредоточенные в приповерхностных областях относительно тонкой, но неоднородной толщины. Игнорирование влияния этих аномалий на форму отражающего горизонта может привести к ухудшению формы волны во всем временном диапазоне и значительной неопределенности при решении об-

ратных кинематических задач в сейсморазведке².

Материалы и методы исследования

Наиболее распространенная модель удельного электрического сопротивления (УЭС) была предложена Г. Е. Арчи [6, 7]. На основе этого было введено понятие параметра пористости, который представляет собой отношение УЭС породы к УЭС проводящего флюида, заполняющего поры (1):

$$P_{\Pi} = \frac{\rho_{\Pi}}{\rho_{fl}}, \quad (1)$$

где P_{Π} – параметр пористости; ρ_{Π} – УЭС породы; ρ_{fl} – УЭС насыщающего флюида.

Параметр пористости, в свою очередь, рассматривается как функция коэффициента пористости. Если поровые каналы образуют систему прямолинейных продольных проводников, то параметр пористости обратно пропорционален коэффициенту пористости³. Если структура токовых каналов более сложная (как наблюдается в природе), то расстояние, которое проходит ток относительно длины образца, увеличится, соответственно, возрастет и абсолютное значение степенного коэффициента в уравнении Арчи.

¹Шелохов И. А. Комплексирование геофизических методов для прогноза скоростной модели части разреза: дисс. ... канд. геол.-минерал. наук: 25.00.10. Иркутск, 2021. 103 с.

²Там же.

³Там же.



Глиносодержащие породы характерны для относительно молодых терригенных образований, которые не претерпели значительной литификации в ходе своего геологического развития.

Слабосцементированные породы в данном случае имеют все шансы быть представлены в варианте смеси песка (с пористостью до 30–40 %) и глины. На проход тока воздействует совокупность большого объема проводимости, обусловленной перемещением ионов в песочной массе, а также поверхностной проводимости, которая является отличительной чертой глин. Первое условие отвечает закону Арчи, что допускает показатель извилистости от 1,05 вплоть до 1,15 в песке.

Взаимосвязь между сопротивлением и минерализацией поровой воды чистых глин более сложная. При низкой минерализации влияние оказывает поверхностная проводимость: она обеспечивает собственное УЭС глины порядка 2,5 Ом·м.

В ультрапресной воде, в том числе даже с малым объемом глинистого использованного материала, отмечается сопротивление, приблизительно равное сопротивлению чистой глины, деленному на процентное содержание глины в породе⁴. Сопротивление пород в некоторой степени зависит от структуры глины, заполняющей поры песка. На основе петрофизических данных А. А. Рыжов построил номограмму зависимости песчано-глинистой породы от минерализации порового флюида⁵ [8].

Вечная мерзлота – явление, встречающееся в северных регионах России и других государств очень часто. Оно обусловлено отрицательным балансом тепловой энергии. Ниже зоны сезонного влияния не хватает глубинного теплосодержания для поддержания положительных температур в течение всего года. В зависимости от климатического сезона она может простираться от дневной поверхности до основания вечной мерзлоты или быть покрыта слоем сезонного оттаивания, достигающим максимальной толщины в конце лета.

Переход воды в твердую фазу является решающим в отношении формирования значений УЭС. Чистый лед является изолятором, однако осадки, отложенные в пределах криолитозоны, даже если они очень толстые, полностью не промерзают. Капиллярная влага остается незамерзшей и дополнительно насыщается солевыми растворами, вымороженными из породы. Количество незамерзшей связанной воды уменьшается с ростом отрицательных температур и сильно зависит от структуры породы. Полное замерзание связанной воды достигается при температуре ниже -50 °С, но такая температура никогда не встречается на Земле. Влияние вновь образовавшегося льда на УЭС также зависит от степени заполнения льдом поровых пространств в породе. Если внутри них остаются проводящие мостики (массивные криоструктуры), то увеличение сопротивления не так велико. Когда лед становится основным заполнителем (шлировая криотекстура), проводящие мостики разрушаются и сопротивление стремится к УЭС льда.

Изменение УЭС при промерзании не является постепенным, а имеет градиентный характер. Ниже глубины сезонных колебаний температуры градиент времени стабилен, но выше нее УЭС значительно изменяется в зависимости от наличия и толщины сезонно-талого слоя. Отличительной особенностью распределения УЭС песчано-глинистых отложений является сохранение связи между сопротивлением грубодисперсных и тонкодисперсных осадков.

Для кристаллических пород увеличение УЭС вследствие замерзания меньше, чем для осадочных пород. Из-за малой естественной пористости соотношение свободной и связанной воды намного меньше, чем в осадочных породах. В связи с этим УЭС кристаллических пород при промерзании увеличивается не более, чем в 10 раз [9].

Рассмотрим петрофизическую модель упругих свойств. Эмпирическое соотношение скорости и пористости для пористых сред,

⁴ Шелохов И. А. Комплексирование геофизических методов для прогноза скоростной модели части разреза: дисс. ... канд. геол.-минерал. наук: 25.00.10. Иркутск, 2021. 103 с.

⁵ Там же.



заполненных минерализованными флюидом, в 1956 г. предложили М. Р. Дж. Уайли и др. (2):

$$\frac{1}{V} = \frac{1-\phi}{V_{ma}} + \phi/V_{fl}, \quad (2)$$

где V – скорость в объеме породы; ϕ – коэффициент пористости; V_{ma} – скорость в матрице породы; V_{fl} – скорость в насыщающем флюиде [10–13].

Это отношение часто выражают в интервальном времени пробега, называя «уравнением среднего времени»⁶.

При применении данной зависимости необходимо учитывать многочисленные допущения и условия. Независимо от этого, многие авторы предлагают ввести эмпирические поправки для глинистости и смешанной литологии, поскольку они активно используются, когда допущения нарушаются.

Для конкретизации эмпирического уравнения Уайли Л. Л. Раймером с соавторами было предложено соотношение скорости – пористости^{7,8} (3):

$$V = (1 - \phi)^2 V_{ma} + \phi V_{fl}, \quad (3)$$

где V – скорость в объеме породы; ϕ – коэффициент пористости; V_{ma} – скорость в матрице породы; V_{fl} – скорость в насыщающем флюиде.

Также из этого соотношения следует, что (4–6):

$$V = (1 - \phi)^2 V_{ma} + \phi V_{fl}, \quad (4)$$

$$\phi < 37 \%; \quad \frac{1}{V} = \frac{(0.47-\phi)}{(0.1V_{37})} + \frac{(0.37-\phi)}{(0.1V_{47})}, \quad (5)$$

$$37 < \phi < 47 \%; \quad \frac{1}{V} = \frac{(0.47-\phi)}{(0.1V_{37})} + \frac{(0.37-\phi)}{(0.1V_{47})}, \quad (6)$$

$$37 < \phi < 47 \%.$$

Здесь V – скорость в объеме породы; ϕ – коэффициент пористости; V_{ma} – скорость в матрице породы; V_{fl} – скорость в насыщающем флюиде; V_{37} – скорость, рассчитанная для пород с пористостью менее 37 %; V_{47} – скорость, рассчитанная для пород с пористостью более 47 %^{9,10}.

Уравнение (6) имеет схожесть с уравнением среднего по А. Ройсу и используется для расчета скоростей в породах с промежуточной пористостью. Оно выводится путем интерполяции из первых двух (4, 5)¹¹ [14, 15].

Эмпирические преобразования часто не только ценны для получения прямых оценок свойств горных пород, но и выявляют функциональные связи между переменными. Например, можно определить относительное изменение P - и S -волн, вызванное изменением объема пор или содержания глины¹².

Д. Х. Хан с соавторами вывели эмпирические зависимости между скоростью, пористостью и содержанием глины C с помощью ультразвуковых измерений 75 образцов сцементированного песчаника¹³. Измерения проводились при различных значениях эффективного давления и водонасыщения [5, 16]. Рассмотрим некоторые результаты измерений при максимальном и минимальном давлении. Преобразования Хана таковы (7–9):

– для песчаников:

$$40 \text{ МПа } V_p = 6,08 - 8,03\phi V_s = 4,06 - 6,28\phi; \quad (7)$$

– для глинистых песчаников:

$$40 \text{ МПа } V_p = 5,59 - 6,93\phi - 2,18C V_s = 3,52 - 4,91\phi - 1,89C, \quad (8)$$

⁶ Шелохов И. А. Комплексование геофизических методов для прогноза скоростной модели части разреза: дисс. ... канд. геол.-минерал. наук: 25.00.10. Иркутск, 2021. 103 с.

⁷ Mavko G., Mukerji T., Dvorkin J. The rock physics handbook: tools for seismic analysis of porous media. New York: Cambridge university press, 2009. 511 p.

⁸ Sheriff R. E. Encyclopedic dictionary of applied geophysics. Tulsa: Society of Exploration Geophysicists, 2002. 429 p.

⁹ Mavko G., Mukerji T., Dvorkin J. The rock physics handbook: tools for seismic analysis of porous media. New York: Cambridge university press, 2009. 511 p.

¹⁰ Шелохов И. А. Комплексование геофизических методов для прогноза скоростной модели части разреза: дисс. ... канд. геол.-минерал. наук: 25.00.10. Иркутск, 2021. 103 с.

¹¹ Mavko G., Mukerji T., Dvorkin J. The rock physics handbook: tools for seismic analysis of porous media. New York: Cambridge university press, 2009. 511 p.

¹² Шелохов И. А. Комплексование геофизических методов для прогноза скоростной модели части разреза: дисс. ... канд. геол.-минерал. наук: 25.00.10. Иркутск, 2021. 103 с.

¹³ Mavko G., Mukerji T., Dvorkin J. The rock physics handbook: tools for seismic analysis of porous media. New York: Cambridge university press, 2009. 511 p.



$$\begin{aligned} 5 \text{ МПа } V_p &= 5,26 - 7,08\phi - 2,02C \quad V_s = \\ &= 3,16 - 4,77\phi - 1,64C. \end{aligned} \quad (9)$$

Здесь V_p – скорость продольной волны; ϕ – коэффициент пористости; C – константа.

Если принять 1 МПа = 145 psi и градиент эффективного давления = 0,5 psi/фут, измерения при 40 и 5 МПа будут соответствовать глубинам приблизительно 3600 и 450 м.

Можно сделать несколько выводов относительно рассматриваемых плотных песчаников:

- зависимость скорости от глубины менее выражена для хорошо сцементированных, чем для несцементированных песчаников;

- с увеличением пористости и объема глины скорость уменьшается примерно в 2,5 раза;

- при увеличении пористости или объемной доли глины коэффициент Пуассона увеличивается;

- коэффициент Пуассона уменьшается с глубиной.

Д. Х. Хан заметил одно интересное петрофизическое свойство чистого песчаника – это стало возможным благодаря разделению набора данных на несколько категорий [5]. Уравнение для чистого песчаника было выведено с использованием только 10 образцов, однако для получения уравнения для глинистого песчаника использовались все образцы, включая образцы чистого песчаника. Приведенное выше уравнение для песчаника не включает компонент глины. Тем не менее скорость чистого песчаника также может быть рассчитана с помощью уравнения для глинистого песчаника при содержании глины $C = 0$ ¹⁴.

Рассчитанный коэффициент Пуассона может отличаться в зависимости от того, какое уравнение используется. Авторы указывают на петрофизическое значение этой разницы следующим образом: «...очень малые объемы глины (1 % или несколько объемных процентов) значительно снижают модуль упругости

песчаника». Это снижение более выражено для модуля сдвига, чем для модуля объемного сжатия. В типичном классическом бассейне большинство песчаниковых формаций содержит небольшое количество глины. В связи с этим чистый песчаник должен иметь значительно сниженный коэффициент Пуассона по сравнению с окружающим глинистым песчаником^{15,16}.

Основные дисперсные пористые влагонасыщенные породы в оттаявшем состоянии располагаются в следующем порядке: песок, суглинки, супесь, глина, песчаник, мергель, мел и известняк (в порядке возрастания скорости распространения продольных упругих волн). Эти породы характеризуются определенным диапазоном значений скорости продольной волны в зависимости от содержания влаги, структуры и текстуры, и, хотя они могут частично перекрываться, приведенный выше ряд выделяется очень четко. В случае мерзлых пород такая классификация не может быть построена без учета влияния температуры, содержания льда и напряженного состояния, иначе породы разного состава были бы неразличимы даже по средним значениям скорости¹⁷. Решающим фактором является температура породы, поэтому можно построить классификацию скоростей мерзлой породы, чтобы охарактеризовать разнообразие свойств в зависимости от состава породы. На рис. 1 представлена классификация в определенном диапазоне температур, полученная в результате обобщения экспериментальных данных. Как видно из диаграммы, в замороженном состоянии по абсолютному значению скорости продольной упругой волны можно выделить только чистый кварцевый песок, насыщенный водой, при температуре ниже -2...- 3 °С. Другие песчано-глинистые и карбонатные породы могут быть охарактеризованы теми же значениями скорости продольной волны.

¹⁴ Шелохов И. А. Комплексирование геофизических методов для прогноза скоростной модели части разреза: дисс. ... канд. геол.-минерал. наук: 25.00.10. Иркутск, 2021. 103 с.

¹⁵ Mavko G., Mukerji T., Dvorkin J. The rock physics handbook: tools for seismic analysis of porous media. New York: Cambridge university press, 2009. 511 p.

¹⁶ Шелохов И. А. Комплексирование геофизических методов для прогноза скоростной модели части разреза: дисс. ... канд. геол.-минерал. наук: 25.00.10. Иркутск, 2021. 103 с.

¹⁷ Там же.

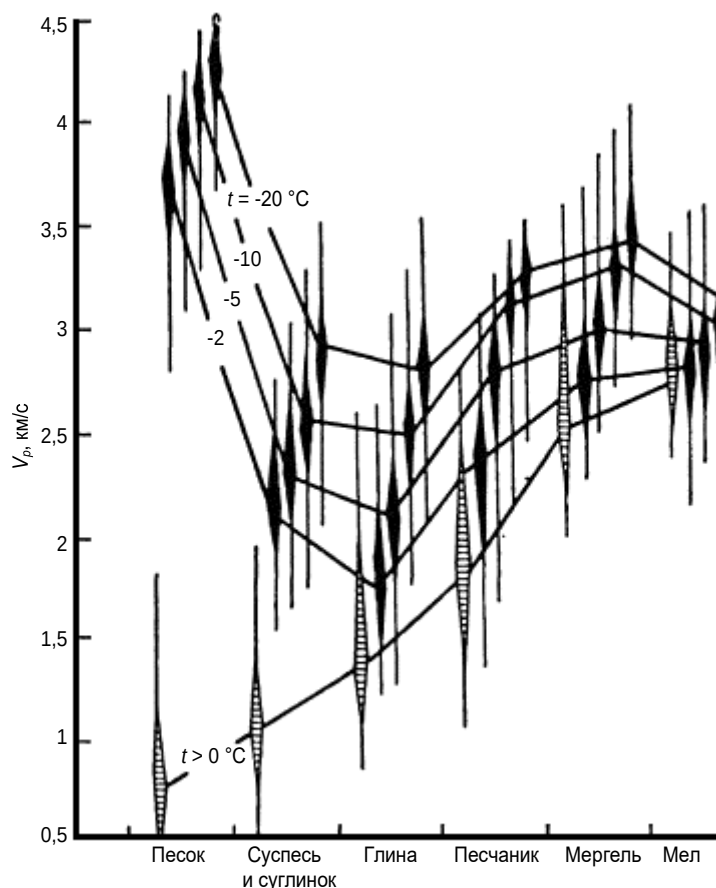


Рис. 1. Диаграмма распределения пород разного литологического состава по скорости продольной волны [17]

Fig. 1. Distribution diagram of rocks of different lithological composition by P-wave velocity [17]

Несмотря на вышеизложенное, рассматривая эти породы при определенной отрицательной температуре, мы обнаруживаем, что они в среднем достаточно четко и стабильно разделяются при значении скорости.

Таким образом, распределение значений скорости продольной волны для влажных пород в замороженном состоянии значительно отличается от их распределения в оттаявшем состоянии (см. рис. 1), что может быть связано с различными фазовыми переходами между водой и льдом в породах с различной дисперсностью и составом пород [17, 18].

Результаты исследования и их обсуждение

Для перехода от геоэлектрических к акустическим свойствам пород можно использовать эмпирические зависимости. В 1951 г. Л. Фаустом впервые была опубликована связь между УЭС и скоростью продольных волн [18]. Актуальность исследования заключалась

в том, что для решения структурной задачи необходимо было рассчитать карту средних скоростей продольных сейсмических волн.

При подборе параметров модели была получена следующая эмпирическая зависимость (10):

$$v = \alpha(ZT)^{\frac{1}{6}}, \quad (10)$$

где v – скорость продольной волны; α – константа; Z – глубина залегания; T – возраст пород изучаемого разреза.

Согласно данным, представленным в данной работе, ошибка в расчете скорости распространения продольных волн по приведенной выше зависимости составила 2–5 %.

Результаты расчетов скоростей, в которых учитывалось влияние литологии, в 1953 г. описал также Л. Фауст [18]. Для учета литологии использовались данные электрического каротажа. В эксперименте значения скоростей продольных волн, полученные по сейсмическим данным, сравнивались со значени-



ями УЭС породы. В результате анализа была получена формула (11):

$$v = \alpha(ZR)^{\frac{1}{6}}, \quad (11)$$

где v – скорость продольной волны; α – константа; Z – глубина залегания; R – УЭС пласта.

Оценка погрешности прогноза скорости по данному уравнению составила 1–2,5 % [19].

С целью обоснования наличия связи между скоростью продольной волны и УЭС для различных геологических условий было выполнено петрофизическое моделирование.

В моделировании рассмотрены такие условия, как:

1. Песчаник при 100 % водонасыщенности, флюид пресный;
2. Песчаник при 100 % водонасыщенности, флюид минерализованный;
3. Глинистый песчаник, пористый при 100 % водонасыщенности, флюид пресный;
4. Глинистый песчаник, пористый при 100 % водонасыщенности, флюид минерализованный;
5. Песчаник крупнозернистый мерзлый;
6. Глинистый разрез, мерзлый.

Из условий 1–4 в качестве исходных данных использовались средние данные по соле-

ности, УЭС пластовой воды и температуре в условиях Восточной Сибири (Ангаро-Ленской ступени). Для условий 5 и 6 моделировались породы, типичные для Западно-Сибирского разреза: глина, песчаник, супесь и суглинок.

Первый случай – это чистый песчаник, насыщенный пресноводным флюидом. В расчетах использовалась модель Арчи для УЭС, и модели Уайли и Гарднера для скорости продольной волны.

Минерализация составила 1 г/л. Скорость продольных волн в матрице – 4000 м/с, скорость продольной волны во флюиде – 1460 м/с. УЭС в матрице – 1000 Ом·м, УЭС во флюиде – 20 Ом·м. Вариативным параметром для данной модели являлась пористость, которая менялась от 0,1 до 0,3.

В этой ситуации четко видна корреляция между УЭС и скоростью продольной волны (рис. 2).

Второй случай – песчаник, насыщенный минерализованным флюидом. В расчетах использовалась модель Арчи для УЭС и модели Уайли и Раймера – Хант – Гарднера для скорости продольной волны.

Минерализация составила 300 г/л. Скорость в матрице – 4000 м/с, скорость продоль-

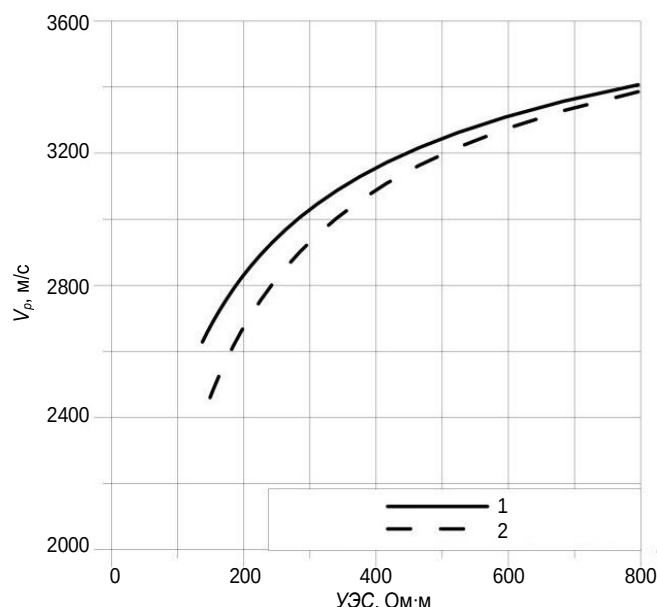


Рис. 2. Модель зависимости удельного электрического сопротивления от скорости продольной волны для пресного флюида:

1 – Арчи – Уайли; 2 – Арчи – Гарднера

Fig. 2. Dependence model of electrical resistivity on P-wave velocity for fresh fluid:

1 – Archie – Wyllie; 2 – Archie – Gardner



ной волны во флюиде – 1300 м/с, УЭС в матрице – 1000 Ом·м, УЭС во флюиде – 0,9 Ом·м. Вариативным параметром для данной модели также являлась пористость, которая менялась от 0,1 до 0,3.

Устойчивая связь между УЭС и скоростью продольных волн вновь обнаружена и для случая с минерализованным флюидом (рис. 3).

Немаловажное значение имеет песчано-глинистая модель. В расчетах использовалась модель Рыжова для УЭС и модель Хана для расчета скорости продольной волны.

Минерализация составляла 1 г/л. Скорость в матрице – 4000 м/с, скорость продольной волны во флюиде – 1460 м/с. УЭС снималось с палетки для конкретной величины газонасыщенности. Вариативным параметром для данной модели являлся коэффициент глинистости, который менялся от 0 до 1.

Видно, что в данной ситуации наблюдается стабильная связь между УЭС и скоростью продольной волны (рис. 4).

На следующем этапе в модели менялась минерализация, которая составила 300 г/л.

Для песчано-глинистых пород, насыщенных минерализующими флюидами, наблюдается большая изменчивость (до 50 %) в зави-

симости скорости от УЭС. Этот факт указывает на то, что стабильность восстановления скорости по УЭС быстро снижается с увеличением минерализации (рис. 5).

Поскольку модель мерзлого участка является преобладающей в большей части исследуемого региона, расчеты модели проводились и для нее.

Для мерзлых участков моделирование проводилось по эмпирической зависимости Боголюбова для УЭС и зависимости Джурика для скорости продольной волны. Моделировались случаи с объемной глинистостью $K_{эл} = 1$, $K_{эл} = 0,3$ и $K_{эл} = 0$. Диапазон температур составлял от 0 до -8°C (рис. 6).

По результатам моделирования можно сделать следующие выводы:

1. В песчанике, насыщенном пресным и минерализованным флюидом, существует стабильная связь между скоростью продольных волн и УЭС, что говорит о том, что скорость может быть восстановлена из УЭС с высокой степенью достоверности в данном типе поперечного сечения.

2. Существует также стабильная связь между УЭС и скоростью продольных волн в случае песчано-глинистых разрезов, насыщенных пресноводными флюидами.

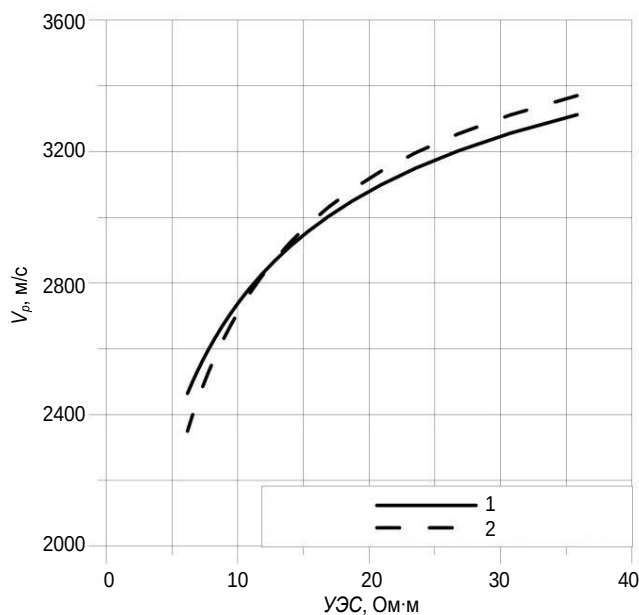


Рис. 3. Модель зависимости удельного электрического сопротивления от скорости продольной волны для минерализованного флюида:

1 – Арчи – Уайлли; 2 – Арчи – Гарднера

Fig. 3. Dependence model of electrical resistivity on P-wave velocity for mineralized fluid:

1 – Archie – Wyllie; 2 – Archie – Gardner

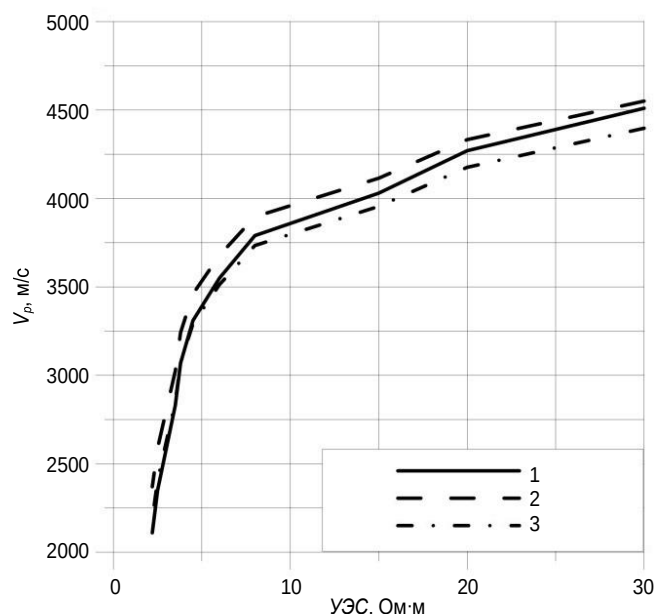


Рис. 4. Модель зависимости удельного электрического сопротивления от скорости продольной волны для пресного флюида:

1 – Рыжова – Тосайи; 2 – Рыжова – Хана; 3 – Рыжова – Кастаньи

Fig. 4. Dependence model of electrical resistivity on P-wave velocity for fresh fluid:

1 – Ryzhov – Tosayi; 2 – Ryzhov – Han; 3 – Ryzhov – Castagny

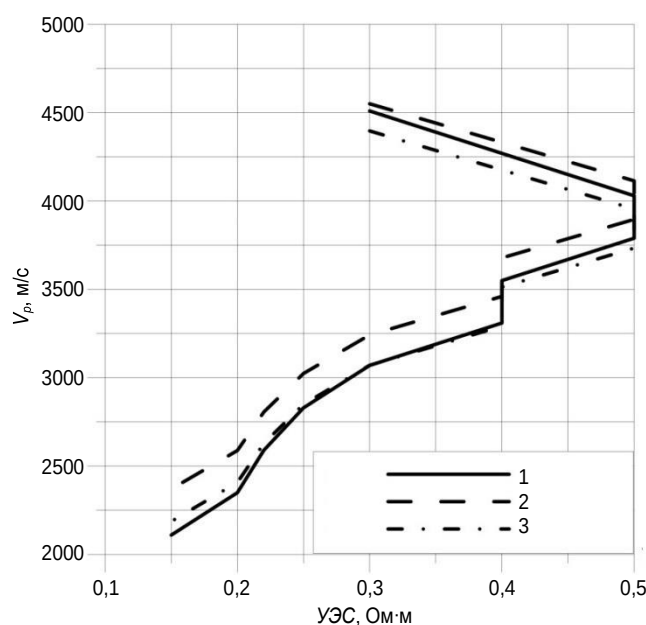


Рис. 5. Модель зависимости удельного электрического сопротивления от скорости продольной волны для минерализованного флюида:

1 – Рыжова – Тосайи; 2 – Рыжова – Хана; 3 – Рыжова – Кастаньи

Fig. 5. Dependence model of electrical resistivity on P-wave velocity for mineralized fluid:

1 – Ryzhov – Tosayi; 2 – Ryzhov – Han; 3 – Ryzhov – Castagny

3. В случае песчано-глинистых пластов, насыщенных минерализованными флюидами, наблюдается высокая изменчивость (до 50 %) во взаимосвязи между УЭС и скоростью продольных волн. Этот факт говорит о том, что стабильность восстановления скорости по

УЭС быстро уменьшается с увеличением минерализации.

4. Для мерзлого разреза связь скорости продольных волн и УЭС также очень высока, что указывает на применимость подхода к этому типу разрезов.

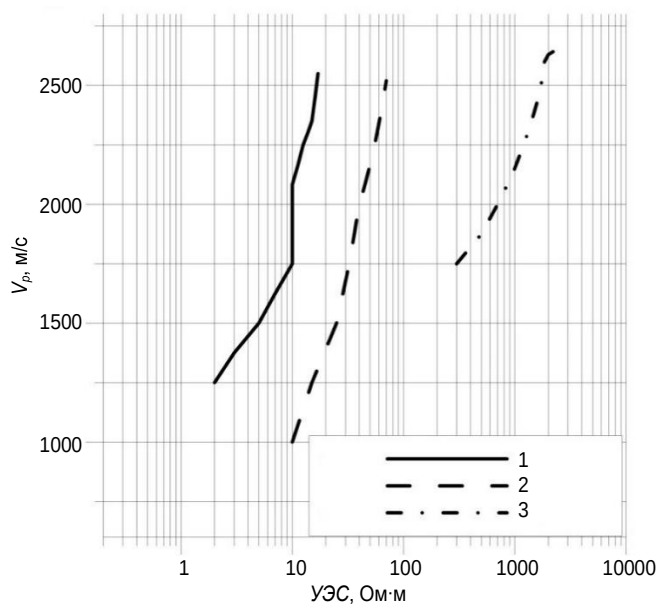


Рис. 6. Модель зависимости удельного электрического сопротивления от скорости продольной волны мерзлого разреза:

1 – $K_{эл} = 1$ (глины); 2 – $K_{эл} = 0,3$ (суглинки); $K_{эл} = 0$ (песчаник)

Fig. 6. Dependence model of electrical resistivity on P-wave velocity of the frozen section:

1 – $K_{cl} = 1$ (clay); 2 – $K_{cl} = 0.3$ (loam); $K_{cl} = 0$ (sandstone)

Закключение

Таким образом, на основе вышеизложенного можно сказать, что в чистом песчанике, насыщенном пресной и минерализованной водой, наблюдается довольно высокая и стабильная корреляция между скоростью продольных волн и УЭС, что указывает на то, что скорость может быть восстановлена из УЭС с высокой степенью достоверности в данном типе разреза.

В песчано-глинистых разрезах, насыщенных пресными флюидами, наблюдается стабильная связь между УЭС и скоростью продольных волн.

Помимо прочего, для песчано-глинистых пластов, насыщенных минерализованными флюидами, наблюдается высокая изменчивость (до 50 %) во взаимосвязи между УЭС и скоростью продольных волн. Этот факт указывает на то, что стабильность восстановления скорости по УЭС быстро уменьшается с увеличением минерализации.

В мерзлом разрезе связь скорости про-

дольных волн и УЭС также очень высока, что указывает на применимость подхода к этому типу разрезов.

Связь между УЭС и скоростью продольных волн настолько чувствительна к изменениям в литологии (данный факт подтверждается синтетическими и экспериментальными данными), что ее невозможно описать с помощью одной корреляционной функции. В то же время использование нескольких зависимостей одновременно делает процесс пересчета очень сложным и может способствовать увеличению ошибок.

В рамках данной работы подтверждено теоретическое обоснование предложенного метода. В будущем авторами планируется проведение серии экспериментов с реальными данными.

Эмпирическое уравнение, такое как уравнение Фауста, включающее коэффициенты, зависящие от литологии, значительно упростит процесс преобразования электрических свойств в акустические.

Список источников

1. Шелохов И. А., Буддо И. В., Смирнов А. С. Подход к восстановлению скоростных характеристик верхней части разреза на основе данных нестационарных электромагнитных зондирований // Приборы и системы разведочной геофизики. 2018. № 1-2. С. 58–68.

2. Shelokhov I. A., Buddo I. V., Smirnov A. S., Sharlov M. V., Agafonov Yu. A. Inversion of TEM responses to create a near surface velocity structure // First Break. 2018. Vol. 36. Iss. 10. P. 47–51. <https://doi.org/10.3997/1365-2397.n0125>.



3. Пат. № 2722861, Российская Федерация. Способ расчета статических поправок / И. А. Шелохов, И. В. Буддо, А. С. Смирнов, М. В. Шарлов, Ю. А. Агафонов. Заявл. 09.07.2019; опублик. 04.06.2020.

4. Шарлов М. В., Буддо И. В., Мисюркеева Н. В., Шелохов И. А., Агафонов Ю. А. Опыт эффективного изучения верхней части разреза методом зондирования становлением поля в ближней зоне с системой Fastsnap // Приборы и системы разведочной геофизики. 2017. № 2. С. 8–23.

5. Шелохов И. А., Буддо И. В., Смирнов А. С., Пьянков А. А., Татянин Н. В. Уточнение скоростной модели верхней части разреза по данным нестационарных электромагнитных зондирований: результаты применения в Восточной и Западной Сибири. Георесурсы. 2021. Т. 23. № 3. С. 60–72. <https://doi.org/10.18599/grs.2021.3.9>.

6. Archie G. E. The electrical resistivity log as an aid in determining some reservoir characteristics // Transactions of the AIME. 1942. Vol. 146. Iss. 1. P. 54–62. <https://doi.org/10.2118/942054-G>.

7. Дахнов В. Н. Геофизические методы определения коллекторских свойств и нефтегазонасыщения горных пород. М.: Недра, 1985. 310 с.

8. Рыжов А. А., Судоплатов А. Д. Расчет удельной электропроводности песчано-глинистых пород и использование функциональных зависимостей при решении гидрогеологических задач // Научно-технические достижения и передовой опыт в области геологии и разведки недр: сб. ст. М.: Изд-во ВИЭМС, 1990. С. 27–41.

9. Поспеев А. В., Буддо И. В., Агафонов Ю. А., Шарлов М. В., Компаниец С. В., Токарева О. В. [и др.]. Современная практическая электроразведка. Новосибирск: Гео, 2018. 231 с.

10. Wyllie M. R. J., Gregory A. R., Gardner L. W. Elastic wave velocities in heterogeneous and porous media //

Geophysics. 1956. Vol. 21. Iss. 1. P. 41–70. <http://dx.doi.org/10.1190/1.1438217>.

11. Wyllie M. R. J., Gregory A. R. Formation factors of unconsolidated porous media: influence of particle shape and effect of cementation // Journal of Petroleum Technology. 1953. Vol. 5. Iss. 4. P. SPE-223-G. <https://doi.org/10.2118/223-G>.

12. Wyllie M. R. J., Gregory A. R., Gardner G. H. F. An experimental investigation of factors affecting elastic wave velocities in porous media // Geophysics. 1958. Vol. 23. Iss. 3. P. 459–493. <https://doi.org/10.1190/1.1438493>.

13. Wyllie M. R. J., Gardner G. H. F., Gregory A. R. Studies of elastic wave attenuation in porous media // Geophysics. 1963. Vol. 27. Iss. 5. P. 569–589. <https://doi.org/10.1190/1.1439063>.

14. Sheriff R., Geldart L. Exploration seismology. New York: Cambridge University Press, 1995. 622 p.

15. Sheriff R. E. Inferring stratigraphy from seismic data // AAPG Bulletin. 1976. Vol. 60. Iss. 4. P. 528–542. <https://doi.org/10.1306/83D923F7-16C7-11D7-8645000102C1865D>.

16. Han D.-H., Nu A., Morgan D. Effects of porosity and clay content on wave velocities in sandstones // Geophysics. 1986. Vol. 51. Iss. 11. P. 2093–2107. <https://doi.org/10.1190/1.1442062>.

17. Джурик В. И., Лещиков Ф. Н. Экспериментальные исследования сейсмических свойств мерзлых грунтов // Доклады и сообщения: Междунар. конф. по мерзлотоведению. Якутск, 1973. Вып. 6. С. 64–68.

18. Faust L. Y. A velocity function including lithologic variation // Geophysics. 1953. Vol. 18. Iss. 2. P. 271–288. <https://doi.org/10.1190/1.1437869>.

19. Зайцев С. А., Сысоев А. П. Прогнозирование скоростной модели по данным ГИС // Технологии сейсморазведки. 2016. № 4. С. 56–60. <https://doi.org/10.18303/1813-4254-2016-4-56-60>.

References

1. Shelokhov I. A., Buddo I. V., Smirnov A. S. An approach to restoring the velocity characteristics of the upper part of the section based on the data from non-stationary electromagnetic soundings. *Pribory i sistemy razvedochnoi geofiziki*. 2018;1-2:58-68. (In Russ.).

2. Shelokhov I. A., Buddo I. V., Smirnov A. S., Sharlov M. V., Agafonov Yu. A. Inversion of TEM responses to create a near surface velocity structure. *First Break*. 2018;36(10):47-51. <https://doi.org/10.3997/1365-2397.n0125>.

3. Shelokhov I. A., Buddo I. V., Smirnov A. S., Sharlov M. V., Agafonov Yu. A. *Static corrections calculation method*. Patent RF, no. 2722861; 2020. (In Russ.).

4. Sharlov M. V., Buddo I. V., Misjurkeeva N. V., Shelokhov I. A., Agafonov Ju. A. Experience of effective study of the upper part of the section by near-field transient electromagnetic sounding method with fastsnap system. *Pribory i sistemy razvedochnoi geofiziki*. 2017;2:8-23. (In Russ.).

5. Shelokhov I. A., Buddo I. V., Smirnov A. S., Piyankov A. A., Tatiyanin N. V. Shallow velocity model from the transient electromagnetic method data: results of application in Eastern and Western Siberia. *Georesursy = Georesources*. 2021;23(3):60-72. (In Russ.). <https://doi.org/10.18599/grs.2021.3.9>.

6. Archie G. E. The electrical resistivity log as an aid in determining some reservoir characteristics. Transactions of the AIME. 1942;146(1):54-62. <https://doi.org/10.2118/942054-G>.

7. Dakhnov V. N. *Geophysical methods for determining reservoir properties and oil and gas saturation of rocks*. Moscow: Nedra; 1985. 310 p. (In Russ.).

8. Ryzhov A. A., Sudoplatov A. D. Calculation of sandy-clay rock specific electrical conductivity and use of functional dependencies in solving hydrogeological problems. In: *Nauchno-tekhnicheskie dostizheniya i peredovoi opyt v oblasti geologii i razvedki neдр = Scientific and technical achievements and advanced experience in the field of geology and subsoil exploration*. Moscow: All-Union Institute of Economics of Mineral Resources and Geological Exploration; 1990, p. 27–41. (In Russ.).

9. Pospeev A. V., Buddo I. V., Agafonov Yu. A., Sharlov M. V., Kompaniets S. V., Tokareva O. V., et al. *Modern practical electrical exploration*. Novosibirsk: Geo; 2018. 231 p. (In Russ.).

10. Wyllie M. R. J., Gregory A. R., Gardner L. W. Elastic wave velocities in heterogeneous and porous media.



Geophysics. 1956;21(1):41-70. <http://dx.doi.org/10.1190/1.1438217>.

11. Wyllie M. R. J., Gregory A. R. Formation factors of unconsolidated porous media: influence of particle shape and effect of cementation. *Journal of Petroleum Technology*. 1953;5(4):SPE-223-G. <https://doi.org/10.2118/223-G>.

12. Wyllie M. R. J., Gregory A. R., Gardner G. H. F. An experimental investigation of factors affecting elastic wave velocities in porous media. *Geophysics*. 1958;23(3):459-493. <https://doi.org/10.1190/1.1438493>.

13. Wyllie M. R. J., Gardner G. H. F., Gregory A. R. Studies of elastic wave attenuation in porous media. *Geophysics*. 1963;27(5):569-589. <https://doi.org/10.1190/1.1439063>.

14. Sheriff R., Geldart L. *Exploration seismology*. New York: Cambridge University Press; 1995. 622 p.

15. Sheriff R. E. Inferring stratigraphy from seismic

data. *AAPG Bulletin*. 1976;60(4):528-542. <https://doi.org/10.1306/83D923F7-16C7-11D7-8645000102C1865D>.

16. Han D.-H., Nu A., Morgan D. Effects of porosity and clay content on wave velocities in sandstones. *Geophysics*. 1986;51(11):2093-2107. <https://doi.org/10.1190/1.1442062>.

17. Dzhurik V. I., Leshchikov F. N. Experimental studies of seismic properties of frozen soils. In: *Doklady i soobshcheniya: Mezhdunar. konf. po merzlotovedeniyu = Reports and contributions: International conference on permafrost studies*. Yakutsk; 1973, iss. 6, p. 64-68. (In Russ.).

18. Faust L. Y. A velocity function including lithologic variation. *Geophysics*. 1953;18(2):271-288. <https://doi.org/10.1190/1.1437869>.

19. Zaytsev S. A., Sysoev A. P. Log data based velocity model prognosis. *Tekhnologii seismorazvedki*. 2016;4: 56-60. (In Russ.). <https://doi.org/10.18303/1813-4254-2016-4-56-60>.

Информация об авторах / Information about the authors



Шелохов Иван Антонович,

кандидат геолого-минералогических наук,
младший научный сотрудник Лаборатории комплексной геофизики,
Институт земной коры СО РАН,
г. Иркутск, Россия,
Научный центр изучения Арктики,
ведущий научный сотрудник,
г. Салехард, Россия,
sia@crust.irk.ru.

Ivan A. Shelokhov,

Cand. Sci. (Geol. & Mineral.),
Junior Researcher of the Laboratory of Integrated Geophysics,
Institute of the Earth's Crust SB RAS,
Scientific Center for the Study of the Arctic,
Leading Researcher,
Salekhard, Russia,
sia@crust.irk.ru.



Поспеев Александр Валентинович,

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

Alexander V. Pospeev,

Dr. Sci. (Geol. & Mineral.), Professor,
Leading Researcher of the Oil and Gas Laboratory,
Institute of the Earth's Crust SB RAS,
Irkutsk, Russia,
avp@crust.irk.ru.



Буддо Игорь Владимирович,

кандидат геолого-минералогических наук,
заведующий Лабораторией комплексной геофизики,
Институт земной коры СО РАН,
г. Иркутск, Россия,
доцент кафедры прикладной геологии, геофизики и геоинформационных систем,
Институт недропользования,
Иркутский национальный исследовательский технический университет,
г. Иркутск, Россия,
ведущий научный сотрудник,
Научный центр изучения Арктики,



г. Салехард, Россия,
biv@crust.irk.ru.
Igor V. Buddo,
Cand. Sci. (Geol. & Mineral.),
Head of the Laboratory of Integrated Geophysics,
Institute of the Earth's Crust SB RAS,
Irkutsk, Russia,
Associate Professor of the Department of Applied Geology,
Geophysics and Geoinformation Systems,
Institute of Subsoil Use,
Irkutsk National Research Technical University,
Irkutsk, Russia,
Scientific Center for the Study of the Arctic,
Salekhard, Russia,
Leading Researcher,
biv@crust.irk.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 07.09.2022; одобрена после рецензирования 11.10.2022; принята к публикации 14.11.2022.

The article was submitted 07.09.2022; approved after reviewing 11.10.2022; accepted for publication 14.11.2022.



Научная статья

УДК 504.4.054

<https://doi.org/10.21285/2686-9993-2022-45-4-380-391>

Содержание искусственных и естественных радионуклидов в донных отложениях водных объектов юго-западной части Алтайского края

Оксана Юрьевна Коровина^a, Владимир Александрович Сомин^b,
Альмира Курмановна Айдарханова^c, Лариса Федоровна Комарова^d

^{a,b,d}Алтайский государственный технический университет им. И. И. Ползунова, г. Барнаул, Россия

^cИнститут радиационной безопасности и экологии, г. Курчатов, Республика Казахстан

Автор, ответственный за переписку: Сомин Владимир Александрович, vladimir_somin@mail.ru

Резюме. Целью представленного исследования являлось изучение и анализ экологического состояния малых водотоков и водоемов юго-западной части Алтайского края (Россия), которые ранее подвергались радиационному воздействию в результате ядерных испытаний, проходивших на Семипалатинском полигоне. В ходе работы авторами получены результаты исследований содержания искусственных и естественных радионуклидов в донных отложениях рассматриваемых водных объектов. Отбор образцов донных отложений и их аналитические исследования были выполнены в 2020–2022 гг. При отборе проб проведены замеры мощности дозы гамма-излучения донных отложений. После их подготовки (высушивания, измельчения) выполнены измерения плотности потока альфа- и бета-частиц от поверхности. Лабораторные исследования образцов осуществлены с использованием высокочувствительного аналитического оборудования: гамма-спектрометра ORTEC GEM25P4-70, альфа-спектрометра Alpha Analyst A1200-32AM CANBERRA, бета-спектрометра TRI-CARB 3110TR PerkinElmer. В донных отложениях определены активности естественных (калия-40, тория-232, радия-226) и искусственных (амерция-241, плутония-239+240, цезия-137 и стронция-90) радионуклидов. В результате исследований установлено, что радиационные параметры донных отложений водных объектов юго-западной части Алтайского края не превышают нормативного уровня, остатки следов ядерных испытаний, проходивших на испытательном полигоне, в исследуемых водных объектах в настоящее время не обнаружены.

Ключевые слова: искусственные и естественные радионуклиды, поверхностные воды, донные отложения, юго-западная часть Алтайского края

Благодарности: Авторы выражают благодарность директору Института радиационной безопасности и экологии Национального ядерного центра Республики Казахстан А. О. Айдарханову и его сотрудникам Л. В. Тимоновой, Н. В. Захаровой, Г. А. Коваленко, Г. Ы. Досмамбетовой за сотрудничество и профессионализм при выполнении аналитических исследований в соответствии с поставленными задачами.

Для цитирования: Коровина О. Ю., Сомин В. А., Айдарханова А. К., Комарова Л. Ф. Содержание искусственных и естественных радионуклидов в донных отложениях водных объектов юго-западной части Алтайского края // Науки о Земле и недропользование. 2022. Т. 45. № 4. С. 380–391. <https://doi.org/10.21285/2686-9993-2022-45-4-380-391>.

Original article

The concentrations of artificial and natural radionuclides in the bottom sediments of south-west Altai territory water bodies

Oksana Yu. Korovina^a, Vladimir A. Somin^b,
Almira K. Aidarkhanova^c, Larisa F. Komarova^d

^{a,b,d}Polzunov Altai State Technical University, Barnaul, Russia

^cInstitute of Radiation Safety and Ecology, Kurchatov, Republic of Kazakhstan

Corresponding author: Vladimir A. Somin, vladimir_somin@mail.ru

Abstract. The purpose of the research is to study and analyze the environmental condition of small streams and reservoirs in the southwestern part of the Altai Territory (Russia), which were previously exposed to radiation as a result of nuclear tests at the Semipalatinsk test site. Conducting the research, the authors obtained the results of studying the content of artificial and natural radionuclides in the bottom sediments of the water bodies under investigation. Sampling of bottom sediments and their analytical studies were carried out in 2020–2022. The sampling involved measurements of the dose

© Коровина О. Ю., Сомин В. А., Айдарханова А. К., Комарова Л. Ф., 2022



rate of bottom sediment gamma radiation. Having dried and ground the samples, the authors measured the flux density of alpha and beta particles from the surface. Laboratory studies of the samples were carried out using highly sensitive analytical equipment including an ORTEC GEM25P4-70 gamma spectrometer, an Alpha Analyst A1200-32AM CANBERRA alpha spectrometer, and a TRI-CARB 3110TR PerkinElmer beta spectrometer. The activities of natural radionuclides (potassium-40, thorium-232, radium-226) and artificial radionuclides (americium-241, plutonium-239+240, cesium-137 and strontium-90) were identified in the bottom sediments. It was determined that the radiation parameters of bottom sediments of water bodies in the southwestern part of the Altai Territory do not exceed the standard level, and the remains of traces of nuclear tests that took place at the test site are not found in the studied water bodies today.

Keywords: artificial and natural radionuclides, surface waters, bottom sediments, southwestern part of the Altai Territory

Acknowledgements: The authors express their gratitude to A. O. Aidarkhanov, the Director of the Institute of Radiation Safety and Ecology of the National Nuclear Center of the Republic of Kazakhstan, and his colleagues L. V. Timonova, N. V. Zakharova, G. A. Kovalenko, G. Y. Dosmambetova for cooperation and professionalism in carrying out analytical studies in accordance with the tasks set.

For citation: Korovina O. Yu., Somin V. A., Aidarkhanova A. K., Komarova L. F. The concentrations of artificial and natural radionuclides in the bottom sediments of south-west Altai territory water bodies. *Nauki o Zemle i nedropol'zovanie = Earth sciences and subsoil use*. 2022;45(4):380-391. (In Russ.). <https://doi.org/10.21285/2686-9993-2022-45-4-380-391>.

Введение

Территория юго-западной части Алтайского края с 50-х и до конца 80-х гг. прошлого столетия подвергалась различного рода техногенным воздействиям, в результате чего сформировалась существующая в настоящее время неблагоприятная экологическая ситуация. Экологический мониторинг на территории края в основном выполняет Алтайский центр гидрометеорологической службы. По данным исследований центра, основной вклад в загрязнение поверхностных вод объектов Алтайского края вносят нефтепродукты, фенолы, фосфаты, общее железо, медь, аммонийный и нитритный азот, трудно- и легкоокисляемая органика (по химическому потреблению кислорода и биохимическому потреблению кислорода на основе анализа, проводимого в течение 5 суток) [1].

Анализ имеющихся современных данных по экологической ситуации юго-западной части Алтайского края показал, что в настоящее время не проводятся исследования окружающей среды на содержание радионуклидов, которые попали на территорию края в ходе проведения ядерных испытаний на Семипалатинском испытательном ядерном полигоне и которые могут до сих пор присутствовать в окружающей среде, создавая опасность для населения и природных объектов. Основные ис-

следования последствий радиационного воздействия на территорию и население Алтайского края в настоящее время связаны с реконструкцией и расчетом полученных доз облучения населения края, а также медицинскими исследованиями лиц, пострадавших от ядерных испытаний, и их потомков [2].

По опубликованным данным ученых Национального ядерного центра Республики Казахстан [3], в сторону Российской Федерации уходят основные следы радиоактивных выпадений от ядерных испытаний 1949 и 1953 гг. Радиоактивному загрязнению от испытаний 29 августа 1949 г. подверглись несколько районов Алтайского края и Республики Алтай. След от испытаний 12 августа 1953 г. затронул территорию юга Алтайского края, части Новосибирской и Кемеровской областей (рис. 1).

По данным Распоряжения Правительства Российской Федерации № 162-Р от 10 февраля 1994 г., часть населенных пунктов Локтевского, Рубцовского, Змеиногорского, Краснощековского, Курьинского, Поспелихинского и Угловского районов Алтайского края попала в зону, в которой вследствие ядерного испытания 29 августа 1949 г. население получило суммарную эффективную дозу облучения от 50 до более 250 мЗв при норме годовой дозы облучения для населения 1 мЗв в среднем за любые последовательные 5 лет, но не более 5 мЗв в год¹.

¹ О перечне населенных пунктов Алтайского края, подвергшихся радиационному воздействию ядерных испытаний на Семипалатинском полигоне (с изменениями на 8 февраля 2002 года): распоряжение Правительства Российской Федерации № 162-р от 10 февраля 1994 г. [Электронный ресурс]. URL: <https://docs.cntd.ru/document/9007771> (27.04.2022).

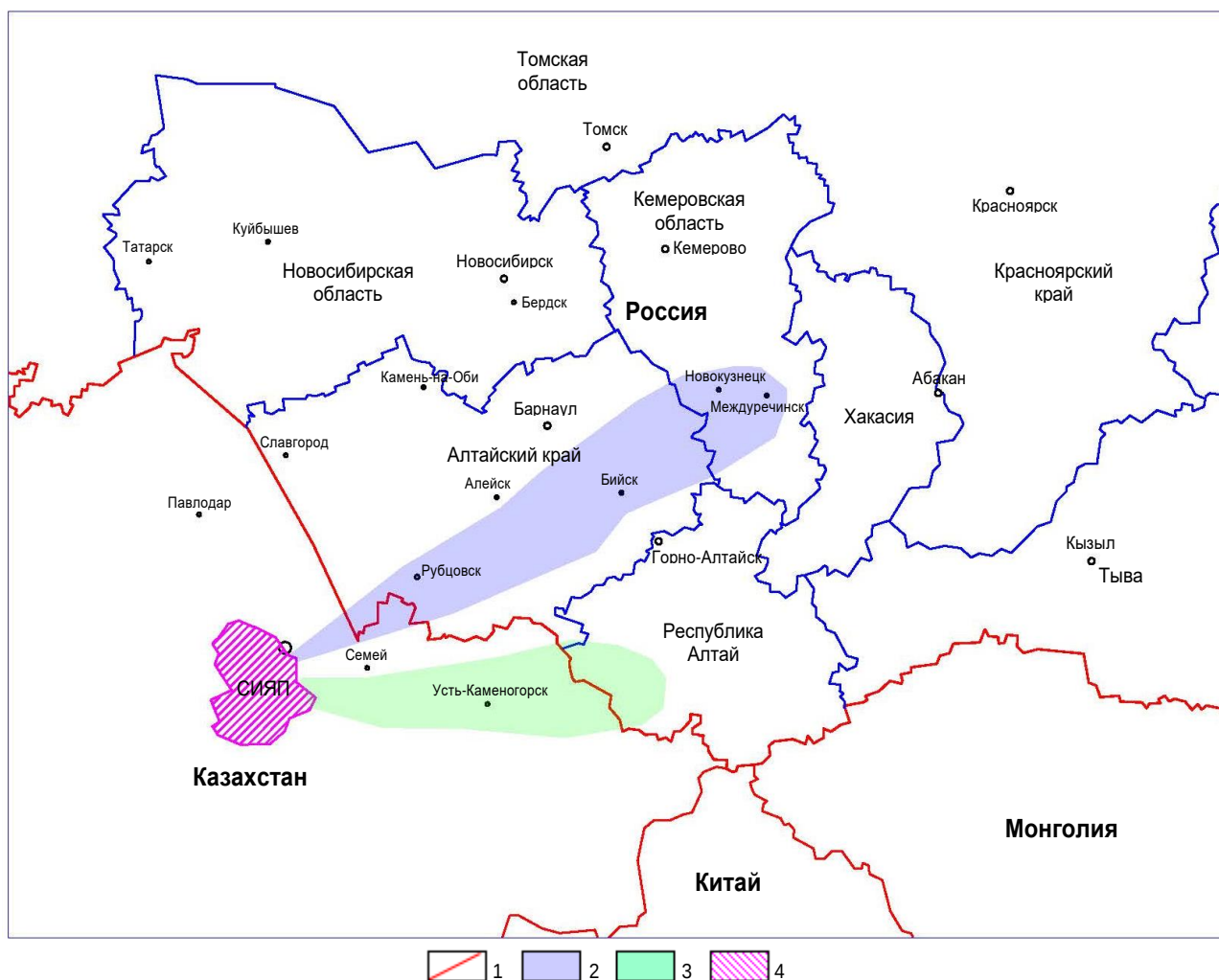


Рис. 1. Схема следов радиоактивных выпадений от испытаний 1949 и 1953 гг.:
1 – государственная граница; 2 – радиоактивный след 1953 г.; 3 – радиоактивный след 1949 г.;
4 – Семипалатинский испытательный ядерный полигон

Fig. 1. Diagram of traces of radioactive fallouts resulting from tests in 1949 and 1953:
1 – state border; 2 – radioactive trace of 1953; 3 – radioactive trace of 1949;
4 – Semipalatinsk nuclear test site

Изучением радиационной обстановки в Алтайском крае занимались многие исследователи – как в период проведения испытаний на Семипалатинском полигоне, так и после его закрытия². В 1999 г. были опубликованы исследования радиационного воздействия на население Алтайского края, выполненные Я. Н. Шойхетом и его коллегами [4].

Имеются интересные результаты реконструкции следов радиоактивного загрязнения, полученные В. Ф. Рапутой и Т. В. Ярославцевой [5]. Путем математического моделирования эти исследователи выполнили численную реконструкцию следов взрывов 29 августа

1949 г. и 12 августа 1953 г. В ходе анализа из приведенных наиболее значимых следов за пределами территории Семипалатинского полигона видно, что масштабы радиоактивного загрязнения после термоядерного взрыва в 1953 г. были максимальными по сравнению с теми, которые наблюдались после взрывов в предыдущие и последующие годы. Плотность загрязнения радиоактивным нуклидом ^{137}Cs территории Алтайского края по материалам ряда исследователей составляла от 15 до 175 мКи/км² [6, 7].

В настоящее время радиационный фон территории, попавшей под след радиоактив-

² Азаев Ю. Л. Радиационно-гигиеническая обстановка в предгорьях Алтая и ее оптимизация на курорте Белокуриха: автореф. дисс. ... кандид. мед. наук: 14.00.07. Кемерово, 1997. 22 с.



ных выпадений, соответствует нормативному уровню. С момента закрытия испытательного полигона произошли естественные процессы восстановления экосистемы путем миграции радионуклидов с поверхности в грунт, их радиоактивного распада, а также перемещения по цепочке «окружающая среда – растения – животные – человек».

По данным исследований И. Б. Колядо [7], особенность формирования доз облучения населения Алтайского края в результате ядерных испытаний заключается в том, что подавляющая часть дозы формировалась короткоживущими радионуклидами. В результате этого 80 % дозы реализовалось в течение первой недели после радиационного воздействия (взрыва). Данный вид облучения населения рассматривается как преимущественно острый, при котором биологическое действие ионизирующего излучения выше, чем при хроническом облучении. Таким образом, И. Б. Колядо делает вывод: на основании многолетних научных исследований было дано заключение о том, что на Алтае в настоящее время есть люди, пострадавшие от радиационного воздействия, главным образом от влияния испытаний ядерного оружия, но нет загрязненных территорий, то есть нет никаких ограничений для проживания людей и землепользования.

По нашему мнению, в настоящее время интерес для ретроспективной оценки радиационной обстановки территории, попавшей под следы радиоактивных выпадений, могут представлять донные отложения водоемов, так как процессы миграции радионуклидов в них менее интенсивны, а их содержание, в свою очередь, может представлять опасность для животного мира и человека.

Для изучаемого региона подобные исследования ранее не проводились. Имеются материалы исследований для регионов, в которых развита атомная промышленность и загрязнение водоемов радионуклидами возможно в результате сбросов от атомных предприятий и радиационных аварий (Красноярский край, Южный Урал) [8–11]. По сведениям А. И. Смагина³ [12], в пресноводных водоемах

наблюдается сорбция большинства радионуклидов придонными взвесями и грунтами. Способность донных отложений в значительной степени накапливать радиоактивные вещества обуславливает резкое уменьшение их концентрации с увеличением глубины грунтов и их особенно высокую концентрацию в верхних слоях на границе воды и ила.

Имеются результаты исследований учеников из Республики Казахстан по водным объектам, находящимся на территории бывшего Семипалатинского полигона и подвергшимся максимальному воздействию при проведении на полигоне испытаний [13]. По данным работы А. К. Айдархановой [14], исследования воды и донных отложений водных объектов Семипалатинского испытательного полигона показали, что основное количество радионуклидов сконцентрировано в донных отложениях. Коэффициенты распределения радионуклидов (отношение содержания удельной активности радионуклида в донных отложениях к содержанию удельной активности в воде) для $^{239+240}\text{Pu}$ составляют примерно от $1,5 \cdot 10^7$ до $2,8 \cdot 10^5$, для ^{137}Cs – от $3,3 \cdot 10^5$ до $2,3 \cdot 10^3$, для ^{90}Sr – от $1,6 \cdot 10^5$ до $1,1 \cdot 10^2$. Таким образом, исследователи сделали выводы, что состояние донных отложений является наиболее информативным показателем при радиоэкологической оценке водного объекта. Результаты исследований донных отложений позволяют установить наиболее неблагоприятные в радиационном отношении водоемы и водотоки, а также в конечном счете скорректировать состав и объем исследований радиоэкологического состояния водных объектов.

По материалам исследований сотрудников Института радиационной безопасности и экологии Национального ядерного центра Республики Казахстан [14], концентрация техногенных радионуклидов в донных отложениях большинства природных озер, расположенных в границах бывшего Семипалатинского полигона, в среднем достигает 200 Бк/кг ^{137}Cs , 20 Бк/кг ^{241}Am , ^{90}Sr и $^{239+240}\text{Pu}$. Для ^{241}Am и ^{137}Cs коэффициент распределения не рассчитан, так как их численные значения содер-

³ Смагин А. И. Экология водоемов зоны техногенной радиационной аномалии на Южном Урале: автор. дисс. ... д-ра биол. наук: 03.00.16. Пермь, 2008. 50 с.



жания в воде озер не зафиксированы. Для ^{90}Sr коэффициент распределения изменяется от $n \cdot 10^0$ до $n \cdot 10^3$, для $^{239+240}\text{Pu}$ – от $n \cdot 10^1$ до $n \cdot 10^6$. Из этого следует, что в системе «донные отложения – вода» природных озер ^{90}Sr в сопоставимых количествах содержится как в воде, так и в донных отложениях в случае, где коэффициент распределения равен $n \cdot 10^0$, а $^{239+240}\text{Pu}$ преимущественно сосредоточен в донных отложениях.

Содержание ^{241}Am в растениях природных озер находится ниже предела обнаружения используемого аппаратно-методического обеспечения и составляет менее 0,5 Бк/кг. Содержание ^{137}Cs во всех растениях в среднем достигает (17 ± 1) Бк/кг, максимальное значение (80 ± 8) Бк/кг зафиксировано в солеросе, произрастающем на озере на следе 1951 г. Содержание ^{90}Sr в среднем достигает (60 ± 10) Бк/кг, максимальное значение (440 ± 40) Бк/кг зафиксировано в солеросе, отобранном на Внешнем водоеме «Атомного» озера. Содержание $^{239+240}\text{Pu}$ в среднем достигает $(2 \pm 0,5)$ Бк/кг, максимальное значение $(7,4 \pm 2,1)$ Бк/кг зафиксировано в солеросе, произрастающем на оз. Жингылды, расположенном в зоне влияния площадки «Сары-Узень».

Необходимо отметить, что исследования по изучению радиоактивности объектов окружающей среды проводились не только в зоне влияния Семипалатинского ядерного полигона. В частности, А. В. Трапезников в своей работе [15] описал распределение радионуклидов по основным компонентам оз. Червяного, которое в 1957 г. было загрязнено ^{137}Cs и ^{90}Sr в результате крупнейшей радиационной аварии на ПО «Маяк». Исследования проводились в несколько этапов. Объектами его являлись вода, донные отложения, водная растительность и озерная рыба. Данная работа характеризует динамику изменения радиоактивности в объектах окружающей среды озера за период наблюдений с 1957 по 2001 г. с ретроспективной оценкой до 2057 г. По результатам исследований к 2001 г. вода в оз. Червяном соответствовала нормам для питьевой воды и могла использоваться в различных хозяйственных целях. В растительности, донных отложениях и рыбе произошло сниже-

ние активности по ^{137}Cs и ^{90}Sr , однако уровни остались высокими.

В статье [16] А. В. Коржавин и его коллеги из Института экологии растений и животных Уральского отделения Российской академии наук представили сравнительный анализ накопления ^{137}Cs и ^{90}Sr на различных участках Обь-Иртышской речной системы. Показано, что удельные запасы ^{90}Sr увеличиваются в донных отложениях р. Течи на водотоке, в то время как для ^{137}Cs отмечается их существенное снижение. Удельные запасы обоих радионуклидов в донных отложениях на нижележащих участках речной системы «Тобол – Иртыш» монотонно уменьшаются по течению, в то же время запасы ^{90}Sr преобладают над запасами ^{137}Cs .

В своих статьях по Крыму [17–19] А. А. Параскив, Н. Н. Терещенко, А. В. Трапезников и другие авторы представили результаты исследований озер на содержание изотопов $^{239+240}\text{Pu}$ в донных отложениях. Основным источником загрязнения озер являлись глобальные радиоактивные выпадения и авария на Чернобыльской атомной электростанции. Сделанные в результате исследований выводы представляют интерес, так как свидетельствуют о том, что плотность выпадений радионуклидов плутония от глобальных испытаний гораздо выше, чем в результате чернобыльской аварии.

На основании вышеизложенного определено, что в настоящее время для Алтайского края является важным изучить уровень радиоактивности донных отложений водных объектов, попавших под след радиоактивных выпадений от Семипалатинского полигона, с целью оценки риска радиационной опасности для местного населения при использовании природных водных объектов.

Материалы и методы исследований

Настоящие исследования посвящены изучению и анализу экологического состояния малых водотоков и водоемов юго-западной части Алтайского края, которые ранее подвергались радиационному воздействию со стороны Семипалатинского испытательного ядерного полигона.



В работе применялись современные аналитические методы, позволяющие получить корректные данные по содержанию в объектах окружающей среды естественных и искусственных радионуклидов. Подготовка образцов выполнена в лаборатории Алтайского государственного технического университета им. И. И. Ползунова (г. Барнаул, Россия). Аналитические исследования проведены в Лаборатории радиационных исследований Института радиационной безопасности и экологии (г. Курчатов, Казахстан).

Исследования донных отложений водных объектов юго-западной части Алтайского края на содержание естественных и искусственных радионуклидов выполнены в 2020–2022 гг.

Объектами исследований являются малые водотоки и озера юго-запада Алтайского края (р. Никитиха, Крутишка и Корболиха, оз. Горькое, Новогорьевское, Малиновое, Большое Угловское). Результаты исследований р. Никитихи, Крутишки и Корболихи, восточной

сторон оз. Горького и Новогорьевского были получены в 2021 г. и опубликованы авторами в 2022 г. в статье [20]. Материалы исследований юго-западной части оз. Горького, Новогорьевского, Малинового и Большого Угловского получены в ходе полевых исследований в 2022 г.

Указанные водные объекты попадают под след радиоактивных выпадений Семипалатинского ядерного полигона. Схема расположения объектов исследования представлена на рис. 2.

Измерения плотности потока альфа- и бета-частиц от поверхности донных отложений проведены в полевых условиях с использованием дозиметра-радиометра МКС-03СА.

Оценка активности в пробах донных отложений ^{241}Am и ^{137}Cs выполнена с помощью гамма-спектрометра ORTEC GEM25P4-70. Содержание в пробе ^{90}Sr определено по дочернему ^{90}Y после радиохимического выделения с помощью бета-спектрометра TRI-CARB

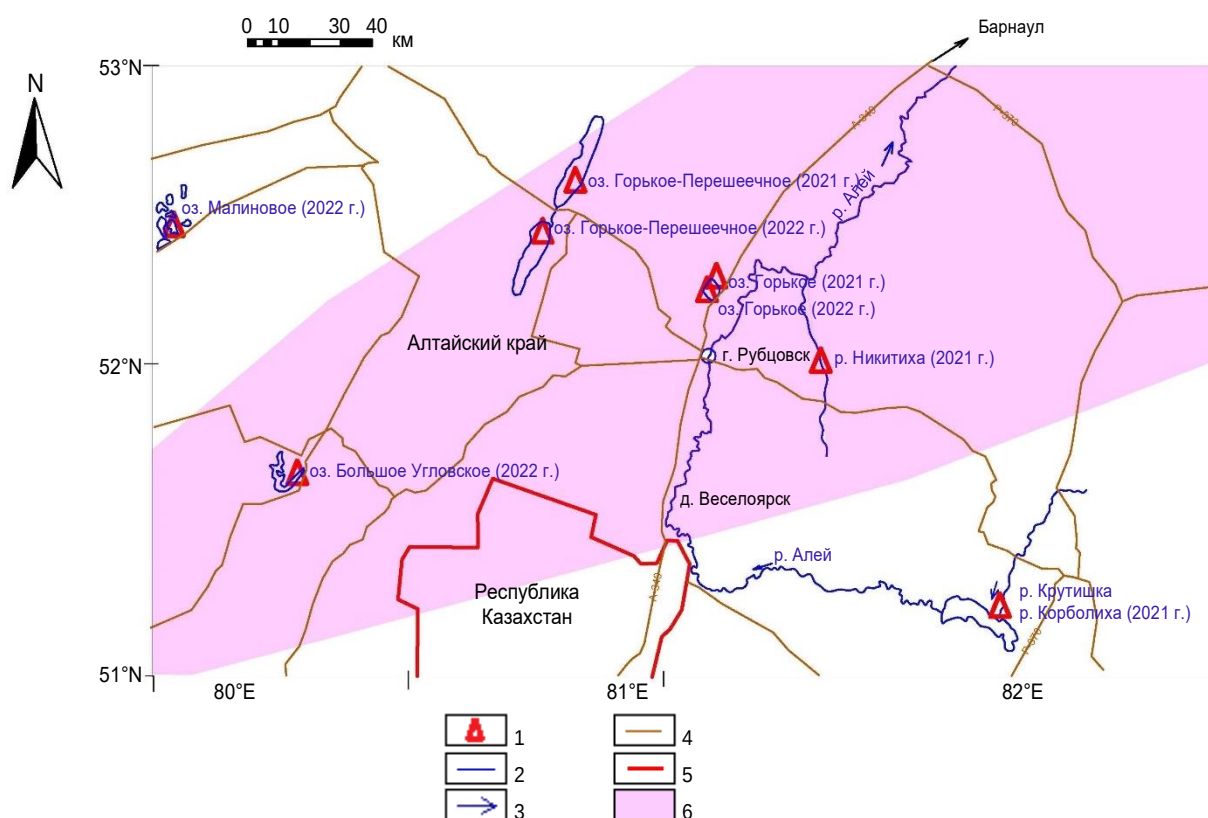


Рис. 2. Схема расположения объектов исследования:

1 – район отбора проб; 2 – речная сеть, контур акватории; 3 – направление течения водотока;
4 – ось автомобильной дороги; 5 – государственная граница; 6 – след радиоактивных выпадений

Fig. 2. Site diagram of research objects:

1 – sampling area; 2 – river network, water area contour; 3 – direction of watercourse flow;
4 – motor-road axis; 5 – state border; 6 – trace of radioactive fallouts



3110TR PerkinElmer. Изотопы $^{239+240}\text{Pu}$ измерены с помощью альфа-спектрометра Alpha Analyst A1200-32AM CANBERRA после приготовления счетного образца методом экстракционно-хроматографического выделения и электролитического осаждения.

Лабораторные исследования проведены при помощи поверенного аналитического оборудования. Отбор образцов выполнен в соответствии с требованиями ГОСТ 17.1.5.01-80⁴.

Результаты исследований и их обсуждение

Результаты полевых исследований представлены в табл. 1.

По данным полевых исследований, мощность дозы гамма-излучения донных отложений оз. Горького-Перешеечного составила 0,08–0,12 мкЗв/ч, оз. Горького – 0,08–0,17 мкЗв/ч, р. Никитихи – 0,1–0,16 мкЗв/ч, р. Крутишки – 0,14–0,22 мкЗв/ч, р. Корболихи – 0,09–0,13 мкЗв/ч, оз. Малинового – 0,09–0,13 мкЗв/ч, оз. Большого Угловского – 0,10–0,14 мкЗв/ч.

После высушивания образцов донных отложений была проведена оценка плотности потока бета-частиц. По данным измерений определено, что плотность потока бета-частиц от поверхности донных отложений составляет: оз. Горького-Перешеечного – 0,4–1,6, оз. Горького – 0,4–2,3, р. Никитихи – 1,4–2,4,

Таблица 1. Результаты исследований проб донных отложений
Table 1. Research results of bottom sediment samples

Объект	Мощность дозы гамма-излучения, мкЗв/ч	Поток, бета-частиц/см ² мин	Год исследования*
Озеро Горькое-Перешеечное (восточная часть)	0,1 ± 0,02	1,3 ± 0,3	2021
Озеро Горькое-Перешеечное (юго-западная часть)	0,1 ± 0,02	0,5 ± 0,1	2022
Озеро Горькое (восточная часть)	0,14 ± 0,03	1,8 ± 0,5	2021
Озеро Горькое (юго-западная часть)	0,1 ± 0,02	0,5 ± 0,1	2022
Река Никитиха	0,13 ± 0,03	1,9 ± 0,5	2021
Река Крутишка	0,18 ± 0,04	3,3 ± 0,8	2021
Река Корболиха	0,11 ± 0,02	0,5 ± 0,1	2021
Озеро Малиновое	0,11 ± 0,02	0,7 ± 0,1	2022
Озеро Большое Угловское	0,12 ± 0,02	0,6 ± 0,1	2022
Предельно допустимый уровень**	0,3	0,4 Бк/см ² (~10 бета-частиц/см ² мин)	–
Фоновое значение для почвенного покрова Алтайского края	0,09–0,12	< 0,5	–

Примечание: * Результаты исследований проб донных отложений 2021 г. взяты из работы авторов [20].

** Предельно допустимый уровень указан согласно Основным санитарным правилам обеспечения радиационной безопасности от 26 апреля 2010 г.⁵, Методике измерений параметров радиоактивного загрязнения производственных помещений, элементов производственного оборудования, средств индивидуальной защиты и кожных покровов работника для целей специальной оценки условий труда, утвержденной 6 декабря 2018 г.⁶, Нормам радиационной безопасности НРБ-99/2009, утвержденным 7 июля 2009 г.⁷.

⁴ ГОСТ 17.1.5.01-80. Общие требования к отбору проб донных отложений водных объектов для анализа на загрязненность. Введ. 01.01.1982 [Электронный ресурс]. URL: <https://docs.cntd.ru/document/1200012787> (27.04.2022).

⁵ Об утверждении СП 2.6.1.2612-10 «Основные санитарные правила обеспечения радиационной безопасности (ОСПОРБ-99/2010)»: постановление главного государственного санитарного врача Российской Федерации № 40 от 26 апреля 2010 г. [Электронный ресурс]. URL: https://orfi.ru/files/doc/uchcenter/osporb_2612612-10.pdf (27.04.2022).

⁶ Методика измерений параметров радиоактивного загрязнения производственных помещений, элементов производственного оборудования, средств индивидуальной защиты и кожных покровов работника для целей специальной оценки условий труда. Утв. 06.12.2018. М., 2018. [Электронный ресурс]. URL: <https://files.stroyinf.ru/Data2/1/4293731/4293731319.pdf> (27.04.2022).

⁷ Нормы радиационной безопасности НРБ-99/2009: санитарные правила и нормативы СанПиН 2.6.1.2523-09. Утв. 7.07.2009. [Электронный ресурс]. URL: <https://docs.cntd.ru/document/902170553?marker=656010> (27.04.2022).



р. Крутишки – 2,5–4,1, р. Корболихи – 0,4–0,6, оз. Малинового – 0,6–0,8, оз. Большого Угловского – 0,5–0,7 бета-частиц/мин см².

В результате экспрессных исследований донных отложений превышения радиоактивных показателей (мощности дозы и потока бета-частиц) зафиксировано не было.

Для получения количественных и качественных данных о радионуклидном составе донных отложений изучаемых водных объектов был проведен лабораторный спектрометрический анализ подготовленных образцов. Результаты испытаний образцов приведены в табл. 2.

Результаты лабораторных исследований показали, что на настоящий момент в донных отложениях водных объектов юго-западной части Алтайского края содержание образующихся в результате ядерных испытаний и при делении ядер в ядерных реакторах искусственных радионуклидов ¹³⁷Cs и ²⁴¹Am менее 1 Бк/кг. Исключение составили донные отложения оз. Горького-Перешеечного в восточной части (на глубине 0,2–0,4 м), р. Никитихи до обогатительной фабрики (южнее), где

обнаружено 2 Бк/кг ¹³⁷Cs, и оз. Малинового, где зафиксировано содержание ¹³⁷Cs активностью 3 Бк/кг. Обнаруженные активности соответствуют фону глобальных выпадений и не могут быть однозначно идентифицированы как остатки радиоактивности от следов выпадений Семипалатинского ядерного полигона.

Содержание в донных отложениях ⁹⁰Sr обнаружено в оз. Горьком (с восточной стороны) до исследованной глубины 0,4 м, в р. Никитихе и оз. Малиновом.

Изотопы ²³⁹⁺²⁴⁰Pu обнаружены в донных отложениях всех исследуемых водных объектов. Активность данных изотопов в донных отложениях изменяется от 3,7 до 5,8 Бк/кг кроме западной части оз. Горького, Горького-Перешеечного, Малинового и Большого Угловского.

Содержание в донных отложениях естественных радионуклидов (⁴⁰K, ²²⁶Ra, ²³²Th) соответствует природному уровню, нормируемый показатель радиоактивности по естественным радионуклидам (удельная эффективная активность для исследуемых образцов) составил от 69 до 136 Бк/кг, что не превышает нормативного уровня в 370 Бк/кг⁸.

Таблица 2. Результаты лабораторных исследований донных отложений на содержание радионуклидов

Table 2. Results of laboratory research of bottom sediment radionuclide composition

Место отбора	Глубина отбора образца, м	Содержание радионуклидов, Бк/кг							Год исследования*
		Искусственные				Естественные			
		²⁴¹ Am	¹³⁷ Cs	⁹⁰ Sr	²³⁹⁺²⁴⁰ Pu	⁴⁰ K	²²⁶ Ra	²³² Th	
Озеро Горькое-Перешеечное (восточная часть)	0–0,2	< 1	< 1	< 0,4	< 0,4	670 ± 70	3 ± 1	7 ± 1	2021
	0,2–0,4	< 2	2 ± 1	< 0,4	4,9 ± 0,9	650 ± 65	6 ± 1	9 ± 1	2021
Озеро Горькое-Перешеечное (западная часть)	0,2–0,4	< 2	< 1	< 0,4	< 0,07	650 ± 65	< 1	8 ± 1	2022
Озеро Горькое (восточная часть)	0–0,2	< 2	< 1	1,2 ± 0,5	3,7 ± 0,9	590 ± 60	22 ± 2	32 ± 3	2021
	0,2–0,4	< 2	< 1	1,3 ± 0,8	5,1 ± 1,1	585 ± 60	24 ± 2	31 ± 3	2021
Озеро Горькое (западная часть)	0,2–0,4	< 2	< 1	< 0,4	< 0,17	510 ± 50	12 ± 2	30 ± 3	2022
Река Никитиха (до обогатительной фабрики)	0–0,2	< 2	2 ± 1	1 ± 0,6	5,4 ± 1,3	530 ± 50	23 ± 2	39 ± 4	2021
Река Никитиха (после обогатительной фабрики)	0–0,2	< 2	< 1	< 0,8	3,9 ± 1	500 ± 50	17 ± 2	32 ± 3	2021
Река Крутишка	0–0,2	< 2	< 1	< 0,5	4,3 ± 1,3	600 ± 60	33 ± 3	40 ± 4	2021
Река Корболиха	0–0,2	< 2	< 1	< 0,5	5,8 ± 1,3	550 ± 55	30 ± 3	45 ± 4	2021
Озеро Малиновое	0,2–0,4	< 2	3 ± 0,3	1 ± 0,5	< 0,14	600 ± 60	3 ± 1	15 ± 1,5	2022
Озеро Большое Угловское	0,2–0,4	< 2	< 1	< 0,4	< 0,19	600 ± 60	8 ± 1	20 ± 2	2022

Примечание: * Результаты исследований проб донных отложений 2021 г. взяты из работы авторов [20].

⁸ Нормы радиационной безопасности НРБ-99/2009: санитарные правила и нормативы СанПиН 2.6.1.2523-09. Утв. 7.07.2009. [Электронный ресурс]. URL: <https://docs.cntd.ru/document/902170553?marker=656010> (27.04.2022).



Заключение

Результаты проведенных исследований показали, что содержание искусственных и естественных радионуклидов в донных отложениях водоемов юго-западной части Алтай-

ского края не превышает нормативного уровня. Остатки следов ядерных испытаний Семипалатинского испытательного полигона в исследуемых водных объектах в настоящее время не обнаружены.

Список источников

1. Коровина О. Ю., Комарова Л. Ф., Сомин В. А. Выбор основных показателей загрязнения поверхностных вод и донных отложений при проведении экологического мониторинга на примере Алтайского края // Безопасность, защита и охрана окружающей природной среды: фундаментальные и прикладные исследования: сб. докл. Всерос. науч. конф. (г. Белгород, 14–18 октября 2019 г.). Белгород: Изд-во БГТУ, 2019. С. 22–25.
2. Колядо И. Б., Плугин С. В., Трибунский С. И. Последствия влияния радиационного воздействия на территорию и население Алтайского края // Гигиена и санитария. 2018. Т. 97. № 7. С. 609–617. <https://doi.org/10.18821/0016-9900-2018-97-7-609-617>.
3. Актуальные вопросы радиозологии Казахстана. Вып. 1. Радиозологическое состояние «северной» части территории Семипалатинского испытательного полигона / под рук. С. Н. Лукашенко. Павлодар: Дом печати, 2010. 294 с.
4. Шойхет Я. Н., Киселев В. И., Лоборев В. М. Радиационное воздействие на население Алтайского края ядерных испытаний на Семипалатинском полигоне. Барнаул: Изд-во НИИ РМЭП, 1999. 346 с.
5. Рапута В. Ф., Ярославцева Т. В. Реконструкция следов радиоактивного загрязнения от наземных ядерных взрывов на Семипалатинском полигоне // Радиоактивность и радиоактивные элементы в среде обитания человека: материалы V Междунар. конф. (г. Томск, 13–16 сентября 2016 г.). Томск: Изд-во СТТ, 2016. С. 541–545.
6. Медведев В. И., Коршунов Л. Г., Черняго Б. П. Радиационное воздействие Семипалатинского ядерного полигона на Южную Сибирь (опыт многолетних исследований по Восточной и Средней Сибири и сопоставление результатов с материалами по Западной Сибири) // Сибирский экологический журнал. 2005. Т. 12. № 6. С. 1055–1071.
7. Колядо И. Б., Плугин С. В., Коновалов Б. Ю. Последствия ядерных испытаний на Семипалатинском полигоне и новое в работе Алтайского медико-дозиметрического регистра // Аграрная наука – сельскому хозяйству: сб. статей. Барнаул: Изд-во АГАУ, 2016. В 3 кн. Т. 2. С. 296–297.
8. Трапезников А. В., Чеботина М. Я., Юшков П. И., Гусева В. П., Трапезникова В. Н. Исследование водных экосистем в районе Тоцкого радиоактивного следа в Оренбургской области // Проблемы радиозологии и пограничных дисциплин: сб. статей. Нижневартонск: Альстер, 2007. С. 145–151.
9. Трапезников А. В., Молчанова И. В., Караваева Е. Н., Трапезникова В. Н. Миграция радионуклидов в пресноводных и наземных экосистемах. Екатеринбург: Изд-во УрНИВИ, 2007. 400 с.
10. Трапезникова В. Н., Трапезников А. В., Коржавин А. В., Платаев А. П. Содержание тяжелых металлов и радионуклидов в рыбе рек Обь и Иртыш на территории Ханты-Мансийского автономного округа – Югры // Экология в средней и высшей школе: синтез науки и образования: материалы Всерос. науч.-практ. конф. (г. Челябинск, 03–04 октября 2012 г.). Челябинск: Изд-во ЧГПУ, 2012. С. 87–91.
11. Сидоркина О. М., Смагин А. И. Динамика самоочищения воды озера Иртыш от радиоактивного загрязнения // Проблемы географии Урала и сопредельных территорий: материалы II Междунар. науч.-практ. конф. (г. Челябинск, 22–23 мая 2020 г.). Челябинск: Край Ра, 2020. С. 164–171.
12. Смагин А. И., Сидоркина О. М., Тихонова М. А. Особенности поведения радионуклидов в пресноводных водоемах зоны воздействия ПО «Маяк» и их накопление рыбой // Наука ЮУрГУ: материалы LXVI науч. конф. (г. Челябинск, 15–17 апреля 2014 г.). Челябинск: ИЦ ЮУрГУ, 2014. С. 394–399.
13. Айдарханова А. К., Лукашенко С. Н. Характер радионуклидного загрязнения водных объектов бывшего Семипалатинского испытательного полигона // Радиоактивность и радиоактивные элементы в среде обитания человека: материалы V Междунар. конф. (г. Томск, 13–16 сентября 2016 г.). Томск: СТТ, 2016. С. 40–43.
14. Айдарханова А. К., Ларионова Н. В., Мамырбаева А. С., Светачева Ю. В., Кумисханова С. Б. Современные уровни радионуклидного загрязнения природных озер территории Семипалатинского испытательного полигона // Современные проблемы радиобиологии, радиозологии и агроэкологии: сб. докл. Междунар. молодежн. конф. (г. Обнинск, 3–4 октября 2019 г.). Обнинск: Изд-во ВНИИРАЭ, 2019. С. 114–117.
15. Трапезников А. В., Юшков П. И., Николкин В. Н., Трапезникова В. Н., Чеботина М. Я., Гусева В. П. Распределение радионуклидов по основным компонентам оз. Червяное на территории ВУРСА // Экология. 2007. № 1. С. 30–36.
16. Коржавин А. В., Трапезникова В. Н., Николкин В. Н., Трапезников А. В. Сравнительный анализ уровней накопления техногенных радионуклидов в донных отложениях на различных участках Обь-Иртышской речной системы // Радиоактивность и радиоактивные элементы в среде обитания человека: материалы VI Междунар. конф. (г. Томск, 20–24 сентября 2021 г.). Томск: Изд-во ТПУ, 2021. Т. 1. С. 265–268.
17. Параскив А. А., Терещенко Н. Н., Трапезников А. В., Проскурнин В. Ю., Платаев А. П., Чужикова-Проскурнина О. Д. Распределение радионуклидов плутония в донных отложениях соленых озер Крыма в



2016–2018 гг. // Озера Евразии: проблемы и пути их решения: материалы II Междунар. конф. (г. Казань, 19–24 мая 2019 г.). Казань: Изд-во АН РТ, 2019. Ч. 2. С. 151–156.

18. Терещенко Н. Н., Трапезников А. В., Параскив А. А., Проскурнин В. Ю., Платаев А. П., Чужикова-Проскурнина О. Д. Современное состояние распределения техногенных радионуклидов плутония ^{238,239,240}Pu в соленых озерах Крыма // Радиохемозология: успехи и перспективы: материалы чтений памяти акад. Г. Г. Поликарпова (г. Севастополь, 14–16 августа 2019 г.). Севастополь: Изд-во ФИЦ ИнБЮМ, 2019. С. 44.

19. Терещенко Н. Н., Трапезников А. В., Параскив А. А., Проскурнин В. Ю., Платаев А. П. Современные уровни долгоживущих радионуклидов плутония в донных отложениях соленых озер Крыма // Радиационная биология. Радиоэкология. 2020. Т. 60. № 2. С. 211–221. <https://doi.org/10.31857/S0869803120020113>.

20. Коровина О. Ю., Сомин В. А. Экологическое состояние поверхностных вод и донных отложений водных объектов юго-западной части Алтайского края // Вестник НЯЦ РК. 2022. № 1. С. 43–45. <https://doi.org/10.52676/1729-7885-2022-1-43-45>.

References

1. Korovina O. Yu., Komarova L. F., Somin V. A. Selection of the main pollution sources of surface waters and bottom sediments during environmental monitoring for the case of the Altai Territory. In: *Bezopasnost', zashchita i okhrana okruzhayushchei prirodnoi sredy: fundamental'nye i prikladnye issledovaniya: sb. dokl. Vseros. nauch. konf. = Safety, protection and conservation of the natural environment: fundamental and applied research: collection of reports of the All-Russian Scientific Conference*. 14–18 October 2019, Belgorod. Belgorod: Belgorod State Technological University named after V. G. Shukhov; 2019, p. 22–25. (In Russ.).

2. Kolyado I. B., Plugin S. V., Tribunsky S. I. Aftereffects of the impact of the radiation exposure on the territory and the population of the Altai Krai. *Gigiena i sanitariya = Hygiene and sanitation*. 2018;97(7):609–617. (In Russ.). <https://doi.org/10.18821/0016-9900-2018-97-7-609-617>.

3. Lukashenko S. N. *Topical issues of Kazakhstan radioecology. Iss. 1. Radioecological condition of the "northern" part of the Semipalatinsk test site territory*. Pavlodar: Dom pechati; 2010. 294 p. (In Russ.).

4. Shoikhet Ya. N., Kiselev V. I., Loborev V. M. *Radiation impact of nuclear tests at the Semipalatinsk test site on the population of the Altai Territory*. Barnaul: Research Institute of Regional Medical and Environmental Problems; 1999. 346 p. (In Russ.).

5. Raputa V. F., Yaroslavl'tseva T. V. Reconstruction of radioactive contamination traces from terrestrial nuclear explosions at the Semipalatinsk test site. In: *Radioaktivnost' i radioaktivnye elementy v srede obitaniya cheloveka: materialy V Mezhdunar. konf. = Radioactivity and radioactive elements in the human environment: proceedings of the 5th International conference*. 13–16 September 2016, Tomsk. Tomsk: STT; 2016, p. 541–545. (In Russ.).

6. Medvedev V. I., Korshunov L. G., Chernyago B. P. Radiation impact of the Semipalatinsk nuclear test site on South Siberia (long-term studies in Eastern and Central Siberia as compared with the data on Western Siberia). *Sibirskii ekologicheskii zhurnal*. 2005;12(6):1055–1071. (In Russ.).

7. Kolyado I. B., Plugin S. V., Kononov B. Yu. Effects of nuclear tests at the Semipalatinsk test site and the new in the work of the Altai Medical and Dosimetric Register. In: *Agrarnaya nauka – sel'skomu khozyaystvu = Agrarian science to Agriculture*. Barnaul: Altai State Agricultural University; 2016, vol. 2, p. 296–297. (In Russ.).

8. Trapeznikov A. V., Chebotina M. Ya., Yushkov P. I., Guseva V. P., Trapeznikova V. N. Research of water eco-

systems in the area of the Totsk radioactive trace in the Orenburg region. In: *Problemy radioekologii i pogranichnykh distsiplin = Problems of radioecology and related disciplines*. Nizhnevartovsk: Al'ster; 2007, p. 145–151. (In Russ.).

9. Trapeznikov A. V., Molchanova I. V., Karavaeva E. N., Trapeznikova V. N. *Migration of radionuclides in freshwater and terrestrial ecosystems*. Ekaterinburg: Ural Research Veterinary Institute; 2007. 400 p. (In Russ.).

10. Trapeznikova V. N., Trapeznikov A. V., Korzhavin A. V., Plataev A. P. The content of heavy metals and radionuclides in the fish of the Ob and Irtysh rivers on the territory of the Khanty-Mansiysk Autonomous Okrug (Yugra). In: *Ekologiya v srednei i vysshe shkole: sintez nauki i obrazovaniya: materialy Vseros. nauch.-prakt. konf. = Ecology in secondary and higher school: synthesis of science and education: proceedings of the All-Russian scientific and practical conference*. 03–04 October 2012, Chelyabinsk. Chelyabinsk: Chelyabinsk State Pedagogical University; 2012, p. 87–91. (In Russ.).

11. Sidorkina O. M., Smagin A. I. Self-purification dynamics of the Lake Irtyash water from radioactive contamination. In: *Problemy geografii Urala i sopredel'nykh territorii: materialy II Mezhdunar. nauch.-prakt. konf. = Problems of the Urals and adjacent territories geography: proceedings of the 2nd International scientific and practical conference*. 22–23 May 2020, Chelyabinsk. Chelyabinsk: Krai Ra; 2020, p. 164–171. (In Russ.).

12. Smagin A. I., Sidorkina O. M., Tikhonova M. A. Features of radionuclides behavior in freshwater reservoirs of the Industrial Group Mayak impact zone and their accumulation in fish. In: *Nauka YuUrGU: materialy LXVI nauch. konf. = Nauka SUSU: proceedings of the 66th scientific conference*. 15–17 April 2014, Chelyabinsk. Chelyabinsk: Publishing Center of South Ural State University; 2014, p. 394–399. (In Russ.).

13. Aidarkhanova A. K., Lukashenko S. N. The nature of radionuclide contamination of water bodies of the former Semipalatinsk test site. In: *Radioaktivnost' i radioaktivnye elementy v srede obitaniya cheloveka: materialy V Mezhdunar. konf. = Radioactivity and radioactive elements in human environment: proceedings of the 5th International Conference*. 13–16 September, 2016, Tomsk. Tomsk: STT; 2016, p. 40–43. (In Russ.).

14. Aidarkhanova A. K., Larionova N. V., Mamyrbayeva A. S., Svetacheva Yu. V., Kumiskhanova S. B. Modern levels of radionuclide contamination of natural lakes in the territory of the Semipalatinsk test site. In: *Sovremennye prob-*



lemy radiobiologii, radioekologii i agroekologii: sb. dokl. Mezhdunar. molodezhn. konf. = Modern problems of radiobiology, radioecology and agroecology: collected reports of the International youth conference. 3–4 October 2019, Obninsk. Obninsk: Russian Institute of Radiology and Agroecology; 2019, p. 114–117. (In Russ.).

15. Trapeznikov A. V., Yushkov P. I., Nikolkin V. N., Trapeznikova V. N., Chebotina M. Ya., Guseva V. P. Distribution of radionuclides among the main components of lake Chervyanoe in the Eastern Ural radioactive trace. *Ekologiya*. 2007;1:30-36. (In Russ.).

16. Korzhavin A. V., Trapeznikova V. N., Nikolkin V. N., Trapeznikov A. V. Comparative analysis of the accumulation levels of technogenic radionuclides in bottom sediments at various sites of the Ob-Irtysh river system. In: *Radioaktivnost' i radioaktivnye elementy v srede obitaniya cheloveka: materialy VI Mezhdunar. konf. = Radioactivity and radioactive elements in the human environment: proceedings of the 5th International conference*. 20–24 September 2021, Tomsk. Tomsk: National Research Tomsk Polytechnic University; 2021, vol. 1, p. 265–268. (In Russ.).

17. Paraskiv A. A., Tereshchenko N. N., Trapeznikov A. V., Proskurnin V. Yu., Plataev A. P., Chuzhikova-Proskurnina O. D. Plutonium radionuclides distribution in the bottom sediments of the salt lakes of Crimea in 2016–2018. In: *Ozera Evrazii: problemy i puti ikh resheniya: materialy II Mezhdunar. konf. = Lakes of Eurasia: problems*

and solutions: proceedings of the 2nd International conference. 19–24 May 2019, Kazan. Kazan: Academy of Sciences of the Republic of Tatarstan; 2019, pt. 2, p. 151–156. (In Russ.).

18. Tereshchenko N. N., Trapeznikov A. V., Paraskiv A. A., Proskurnin V. Yu., Plataev A. P., Chuzhikova-Proskurnina O. D. The current state of distribution of 238,239,240Pu plutonium technogenic radionuclides in the salt lakes of Crimea. In: *Radiokhemoekologiya: uspekhi i perspektivy: materialy chtenii pamyati akad. G. G. Polikarpova = Radiochemoecology: successes and prospects: materials of the Readings in memory of the Academician G. G. Polikarpov*. 14–16 August 2019, Sevastopol. Sevastopol: Federal Research Center "Institute of Biology of the South Seas named after A.O. Kovalevsky RAS"; 2019, p. 44. (In Russ.).

19. Tereshchenko N. N., Trapeznikov A. V., Paraskiv A. A., Proskurnin V. Yu., Plataev A. P. Modern levels of long-lived radioisotopes of plutonium in bottom sediments of salt lakes of Crimea. *Radiatsionnaya biologiya. Radioekologiya = Radiation Biology. Radioecology*. (In Russ.). 2020; 60(2):211-221. <https://doi.org/10.31857/S0869803120020113>.

20. Korovina O. Yu., Somin V. A. Environmental state of surface waters and bottom sediments in water bodies of the southwestern part of the Altai territory. *Vestnik NYaTs RK = NNC RK Bulletin*. 2022;(1):43-45. <https://doi.org/10.52676/1729-7885-2022-1-43-45>.

Информация об авторах / Information about the authors



Коровина Оксана Юрьевна,

аспирант,
Институт биотехнологии, пищевой и химической инженерии,
Алтайский государственный технический университет им. И. И. Ползунова,
г. Барнаул, Россия,
korano@mail.ru,
<https://orcid.org/0000-0003-1822-0987>.

Oksana Yu. Korovina,

Postgraduate Student,
Institute of Biotechnology, Food and Chemical Engineering,
Polzunov Altai State Technical University,
Barnaul, Russia,
korano@mail.ru,
<https://orcid.org/0000-0003-1822-0987>.



Сомин Владимир Александрович,

доктор технических наук,
заведующий кафедрой химической техники и инженерной экологии,
Институт биотехнологии, пищевой и химической инженерии,
Алтайский государственный технический университет им. И. И. Ползунова,
г. Барнаул, Россия,
vladimir_somin@mail.ru,
<https://orcid.org/0000-0003-3276-5174>.

Vladimir A. Somin,

Dr. Sci. (Eng.),
Head of the Department of Chemical Engineering and Engineering Ecology,
Institute of Biotechnology, Food and Chemical Engineering,
Polzunov Altai State Technical University,
Barnaul, Russia,
vladimir_somin@mail.ru,
<https://orcid.org/0000-0003-3276-5174>.



Айдарханова Альмира Курмановна,

начальник отдела разработки систем мониторинга окружающей среды,
Институт радиационной безопасности и экологии,
г. Курчатова, Республика Казахстан,
almira@nnc.kz,
<https://orcid.org/0000-0003-3737-7111>.

Almira K. Aidarkhanova,

Head of the Department of Environmental Monitoring System Development,
Institute of Radiation Safety and Ecology,
Kurchatov, Republic of Kazakhstan,
almira@nnc.kz,
<https://orcid.org/0000-0003-3737-7111>.



Комарова Лариса Федоровна,

доктор технических наук, профессор,
профессор кафедры химической техники и инженерной экологии,
Институт биотехнологии, пищевой и химической инженерии,
Алтайский государственный технический университет им. И. И. Ползунова,
г. Барнаул, Россия,
htie@mail.ru,
<https://orcid.org/0000-0001-9321-5729>.

Larisa F. Komarova,

Dr. Sci. (Eng.), Professor,
Professor of the Department of Chemical Engineering and Engineering Ecology,
Institute of Biotechnology, Food and Chemical Engineering,
Polzunov Altai State Technical University,
Barnaul, Russia,
htie@mail.ru,
<https://orcid.org/0000-0001-9321-5729>.

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 06.05.2022; одобрена после рецензирования 14.09.2022; принята к публикации 07.11.2022.

The article was submitted 06.05.2022; approved after reviewing 14.09.2022; accepted for publication 07.11.2022.



ГЕОЭКОЛОГИЯ

Научная статья

УДК 553.41/556.3(470.66)

<https://doi.org/10.21285/2686-9993-2022-45-4-392-407>

Геоэкологические последствия излива геотермальной скважины 11-Т Гунюшки на территории Чеченской Республики

Лиана Саидовна Гацаева^a, Алексей Николаевич Гуня^b, Ибрагим Ахмедович Керимов^c^aКомплексный научно-исследовательский институт им. Х. И. Ибрагимова РАН, г. Грозный, Россия^bИнститут географии РАН, г. Москва, Россия^cИнститут истории естествознания и техники им. С. И. Вавилова РАН, г. Москва, Россия

Автор, ответственный за переписку: Гацаева Лиана Саидовна, gls69@yandex.ru

Резюме. Целью данного исследования являлась геоэкологическая оценка влияния изливающихся подземных вод из геотермальных скважин через энергетически насыщенный теплоноситель с его минеральной составляющей на природные и природно-хозяйственные компоненты и в целом структуру всего вмещающего ландшафта на примере скважины 11-Т Гунюшки Чеченской Республики (Россия). Воздействие изливающихся минерализованных вод из геотермальных скважин на природные и природно-хозяйственные компоненты и в общем на структуру всего вмещающего ландшафта является серьезной экологической проблемой всех нефтегазоносных регионов России. Последствия многолетнего излива термальной воды из рассматриваемой скважины проявились в виде трансформации ландшафтов и угнетения растительного покрова, а в месте сброса неочищенных вод от кустарных бальнеологических объектов (ванн, душей) привели к формированию устойчивого очага загрязнения вплоть до коренной перестройки растительных сообществ. В основу проведенной работы были положены полевые данные, полученные коллективом авторов по ландшафтному картографированию. Результаты дешифрирования космических снимков высокого разрешения иллюстрируют динамику изменений ландшафтов под воздействием термальных вод. Авторами были взяты пробы почв и вод, проведены опросы местных жителей, позволившие скорректировать масштабы и возможности использования этих вод. В результате исследования построены физико-географический профиль, ландшафтная карта ареала воздействия геотермальной скважины, карта-схема геоэкологического зонирования исследуемой территории, выделены основные типы ландшафтов, наиболее сильно испытавших трансформацию при наложении нескольких факторов антропогенного происхождения (условий увлажнения и воздействия на почвенно-растительный покров). Проведенное исследование показало, что в результате антропогенного воздействия из сельскохозяйственного оборота изъято более 120 га плодородных земель. Анализ карты-схемы геоэкологического зонирования свидетельствует о том, что 79 % территории находится в зоне косвенного слабого, 7,14 % – в зоне косвенного сильного, а 13,5 % – в зоне прямого сильного уровня экологической напряженности. В последней должны проводиться рекультивационные мероприятия по восстановлению ландшафтов, так как здесь идет процесс опустынивания. На основе проведенных химических анализов воды авторами даны рекомендации по дальнейшему использованию термальных вод в хозяйстве Грозненского района.

Ключевые слова: ландшафт, геотермальная скважина, воздействие, месторождение термальных вод, излив, исследования

Для цитирования: Гацаева Л. С., Гуня А. Н., Керимов И. А. Геоэкологические последствия излива геотермальной скважины 11-Т Гунюшки на территории Чеченской Республики // Науки о Земле и недропользование. 2022. Т. 45. № 4. С. 392–407. <https://doi.org/10.21285/2686-9993-2022-45-4-392-407>.

GEOECOLOGY

Original article

Geoeological effects of the outflow of 11-T Gunyushki geothermal well in the territory of the Chechen Republic

Liana S. Gatsaeva^a, Aleksey N. Gunya^b, Ibragim A. Kerimov^c^aKh. Ibragimov Complex Research Institute RAS, Grozny, Russia^bInstitute of Geography RAS, Moscow, Russia^cS. I. Vavilov Institute for the History of Science and Technology RAS, Moscow, Russia

Corresponding author: Liana S. Gatsaeva, gls69@yandex.ru

© Гацаева Л. С., Гуня А. Н., Керимов И. А., 2022



Abstract. The purpose of the study is a geoeological assessment of the effect of groundwater flowing from geothermal wells through an energetically saturated coolant with its mineral component on natural and natural-economic components as well as on the structure of the entire enclosing landscape for the case of 11-T Gunyushki well of the Chechen Republic (Russia). The impact of the mineralized waters outflowing from geothermal wells on natural and natural-economic components and on the whole structure of the entire enclosing landscape is a challenging environmental problem for all oil and gas regions of Russia. Long-term outflow of thermal water from the well under consideration resulted in landscape transformation and suppression of the vegetation cover. Moreover, a stable source of pollution was formed in the place where untreated water from hand-crafted balneological facilities (baths, showers) was discharged that caused a radical restructuring of plant communities. The conducted research is based on the field data obtained by a team of authors on landscape mapping. Interpretation of high-resolution satellite images has shown the dynamics of landscape changes under the influence of thermal waters. The authors took water and soil samples and questioned local residents, which made it possible to adjust the scale and possibilities of using these waters. The research performed allowed to develop a physical-geographical profile, create a landscape map of the area affected by a geothermal well and an index map of the geoeological zoning of the area under investigation as well as identify the main types of the most transformed landscapes resulting from the combined impact of several anthropogenic factors (humidification and impact on the soil and vegetation cover). Conducted study has shown that more than 120 hectares of fertile lands were withdrawn from agriculture due to the anthropogenic impact. The analysis of the index map of geoeological zoning demonstrates that 79 % of the territory is located in the zone of a weak indirect environmental impact, 7.14 % – in the zone of a strong indirect environmental impact, 13.5 % – in the zone of a strong direct environmental impact. The latter, requires reclamation in order to restore landscapes, since it undergoes desertification. Having performed a number of chemical analyses of water, the authors gave recommendations for the further use of thermal waters in the economy of the Groznensky region.

Keywords: landscape, geothermal well, impact, thermal water deposit, outflow, research

For citation: Gatsaeva L. S., Gunya A. N., Kerimov I. A. Geoeological effects of the outflow of 11-T Gunyushki geothermal well in the territory of the Chechen Republic. *Nauki o Zemle i nedropol'zovanie = Earth sciences and subsoil use.* 2022;45(4):392-407. (In Russ.). <https://doi.org/10.21285/2686-9993-2022-45-4-392-407>.

Введение

Чеченская Республика является старейшим нефтегазоносным районом России. За всю историю нефтедобычи здесь пробурено большое количество скважин различного назначения. Из-за сложного геологического строения данной территории многие скважины как объекты, не выполнившие поставленные задачи, переводились из одной категории в другую, консервировались и т. д. Со временем при нарушении герметичности скважины начинали изливаться флюиды (чаще воду, пароводяную смесь), которые являются большими загрязнителями окружающей среды из-за содержания в своем составе различных газов (углекислого газа, сероводорода, метана, примесей азота и аммиака и др.) и представляют для окружающей среды реальную угрозу. Например, в районе излива термальной воды из скважины 6-Т Курдюковская (ст. Курдюковская) в радиусе 0,5–1 км погибли все древесные и травянистые насаждения, а земля по происшествии 5–7 лет после консервации скважины в местах стока выглядит как выжженная после сильного пожара.

Значение геотермальных скважин в природно-хозяйственном комплексе является большой областью исследований специали-

стов различных областей науки (геологов, географов, химиков, экономистов и т. д.) [1–4]. Изучением геотермальных скважин и проблемами геотермии в целом по Северному Кавказу занимались Г. М. Сухарев, С. А. Шагоянц, И. Ю. Коцарев, М. К. Курбанов, А. Б. Алхасов и другие исследователи. В результате проведенных работ ими изучены вопросы происхождения термальных вод, распределения температур, формирования химического состава, закономерности распределения подземных вод в пределах артезианских бассейнов по вертикальному разрезу и площадям. Было также установлено влияние разработки нефтяных залежей с водонапорным режимом на режим термальных источников, которое проявилось в постепенном истощении, снижении дебита и даже в их полном исчезновении в зависимости от гипсометрического уровня истечения [5–7]. Исследование различных аспектов, связанных с функционированием и влиянием изливающихся геотермальных скважин на географическую среду, хозяйство и расселение, представлено крайне неравномерно (хотя в последние годы и наблюдается повышение интереса к этому направлению) [8–13]. Еще меньше внимания уделено вопросам влияния подземных вод из изливающихся



геотермальных скважин на вмещающие ландшафты. Не разработаны в целом комплексные методы, способные оценить количественные и качественные показатели влияния воздействия изливающихся вод на природные и хозяйственные геосистемы, слабо разработаны методы, ориентированные на площадную оценку влияния точечных объектов, которыми являются скважины во вмещающем ландшафте. Исследования в этой области могли бы сделать существенный вклад в теоретико-методологический инструментарий, описывающий влияние высокоэнергетических компонентов геологической среды на динамику и пространственно-временную организованность географических ландшафтов.

Территория Грозненского района Чеченской Республики, на которой проводились исследования, в течение длительного времени находилась под интенсивным воздействием

нефтедобычи. Влияние различных элементов нефтяного комплекса привело к трансформации целых ландшафтов, которые в наши дни стали основным ареалом сельского расселения и в значительной части используются как пастбища. В ходе полевых исследований на изучаемой территории было обнаружено несколько безымянных скважин: одна из них имеет следы свежей герметизации, но из ее отвода наблюдаются выделения нефти с водой, из второй скважины через резиновый патрубков вытекает горячая вода с температурой 63 °C (рис. 1).

Воздействие изливающихся подземных вод при условии длительности данного процесса во времени может усложнить современное геоэкологическое состояние исследуемой территории, причем факты свидетельствуют о том, что на ландшафты значительно большее воздействие оказывает излив минерализо-



Рис. 1. Безымянные скважины на территории Грозненского района Чеченской Республики
Fig. 1. Unnamed wells in the Groznensky district of the Chechen Republic



ванных флюидов, нежели нефтяное загрязнение. Современное состояние геотермальных скважин на территории Чеченской Республики рассматривается в работах [14, 15]. По 14 месторождениям термальных вод специально пробурено 83 скважины, из них действующий фонд составляет 45 единиц (почти все они находятся в критическом состоянии и изливают термальные воды). Изучение вопросов воздействия изливающихся геотермальных скважин на окружающую среду представляется актуальной проблемой, так как прогнозирование нежелательного ухудшения характеристик компонентов окружающей среды будет способствовать созданию механизмов предотвращения этих отклонений на более раннем этапе развития процесса. Целью данной работы является комплексная геоэкологическая оценка влияния изливающихся термальных вод из геотермальных скважин на природные и природно-хозяйственные компоненты и в целом структуру всего вмещающего ландшафта. В качестве объекта исследования выступают ландшафты и их компоненты в районе изливающейся скважины 11-Т Гунюшки Грозненского района Чеченской Республики, репрезентативность которой обусловлена длительностью воздействия термальных вод и приуроченностью к различным ландшафтными условиям. Задачами настоящей работы являются описание скважины с точки зрения ее взаимоотношения с окружающими ландшафтами, оценка прямого и косвенного влияния изливающихся термальных вод на вмещающий ландшафт, а также выработка рекомендаций для оптимизации нарушенного ландшафта и использования термальных вод.

Материалы и методы исследования

В основу работы положены фондовые материалы по месторождениям термальных вод Чеченской Республики, полевые исследования и картографирование ареала влияния геотермальной скважины 11-Т Гунюшки (в том числе с использованием спутниковых данных и квадрокоптера). Проведено ландшафтное картографирование, выделены различные стадии дигрессии. Были заложены профили, по которым проводились тахеометрическая

съемка рельефа, геоботанические исследования, выделялись основные фитоценозы и ландшафты. Для лабораторных исследований отбирались образцы почв, воды (из устья скважины и техногенных водоемов), растений (для определения класса). На месте производился замер температуры воды, а также анализ ее на цветность, запах [16].

Результаты исследования

История освоения и краткая характеристика объекта исследования. Месторождение термальных вод Гунюшки, в пределах которого пробурено две скважины – 1-Т Гунюшки и 11-Т Гунюшки, находится к западу от г. Грозный и характеризует западную окраину Терско-Сунженского геотермального района. Как известно, основные месторождения приурочены к стыку трех физико-географических областей, наследующих крупные геолого-тектонические единицы: Западного и Среднего Предкавказья, Терско-Кумской низменности и Большого Кавказа. В этом ареале сходятся основные активные геологические структуры, к которым приурочены и месторождения нефти. Именно в процессе поисковых работ на нефть и газ и бурения неоген-палеогеновых толщ были нарушены геотермальные пласты, которые (как в случае со скважиной 11-Т Гунюшки) стали источниками термальных вод, используемых для различных хозяйственных нужд.

История открытия и освоения месторождения термальных вод Гунюшки началась в 20-х гг. XX в., когда в результате буровых работ у с. Гунюшки вода из VI–VII пластов караганского горизонта была выведена на дневную поверхность. Тогда же было предложено ее использование для теплофикации и в бальнеологии. Начиная с 1926 г. скважина 1-Т Гунюшки переливала термальную воду с температурой 72 °С. Первоначальный дебит скважины составлял 1500 м³/сут., затем он снизился до 500–600 м³/сут. В 1991 г. скважина 1-Т Гунюшки была ликвидирована, но в эксплуатации находилась скважина 11-Т Гунюшки (рис. 2), в которой зафиксирован статистический уровень вод I–III пластов карагана по номенклатуре Старогрозненского района на глубине 5 м от устья. Вода скважины отно-



Рис. 2. Скважина 11-Т Гунюшки

Fig. 2. Well 11-T Gunyushki

сится к сульфатно-гидрокарбонатно-натриевому типу, уровень ее минерализации – 1,47 г/л. после принудительного возбуждения скважина переливает за счет термолифта. Максимальный дебит на самоизливе составляет 713 м³/сут. Балансовые запасы по категории А+В+С₁ составляют 1500 м³/сут. Запасы утверждены в 1991 г. Месторождение находится в резерве (нераспределенный фонд) [14–16].

Во время существования Союза Советских Социалистических республик воды месторождения термальных вод Гунюшки использовались для нужд народного хозяйства – горячего водоснабжения объектов инфраструктуры и частного сектора близлежащих населенных пунктов. Часть водоемов образовалась на месте песчаных карьеров, откуда изымалось сырье для Побединского кирпичного завода. В самом производственном процессе основные потребности в воде предприятие закрывало за счет термальных вод. В 60-е гг. XX в. на северном отроге Сунженского хребта функционировал крупный свиноводческий комплекс, для нужд которого также использовалась термальная вода (для отопления, в качестве питьевой воды для скота, для санитарно-бытовых нужд и пр.). В конце 90-х гг. XX в. сточные воды данного комплекса попали в техногенный водоем и дальше по рельефу в Алханчуртский канал. По словам местных жителей, пострадала вся фауна водоемов. На пути к селению к основной нитке водопровода присоединяются несколько врезок, которые подпитывают озера, расположенные у стойбищ

скота. В более ранний период врезки использовались и для кустарных ванн в бальнеологических целях, о чем свидетельствуют полуразрушенные постройки рядом с загонами для скота, на месте которых была баня, функционировавшая здесь до 1990-х гг.

На рис. 3 представлены зональные типы ландшафтов рассматриваемой территории. Из схемы видно, что ареал воздействия скважины 11-Т Гунюшки затрагивает два основных типа: склоны отрогов передовых хребтов, переходящих в межгорные долины, сложенных неогеновыми отложениями из песчаников и глин, частично перекрытых четвертичными отложениями, подгорно- и предгорно-степной полынно-злаковой растительностью, местами деградированной до полупустынной на преимущественно каштановых почвах; террасы и присклоновые поверхности межгорных долин, сложенных преимущественно четвертичными аллювиально-пролювиальными отложениями из глин, супесей и суглинков под окультуренными степями, реже лугостепями на черноземах и каштановых почвах.

По материалам полевых исследований были составлены высотный профиль (рис. 4) и карта ландшафтов (рис. 5), которые демонстрируют физико-географическую дифференциацию территории на локальном уровне. Расположение района исследования на стыке двух типов ландшафтов (ландшафты 2 и 3, рис. 3) дало возможность для активного освоения территории в сочетании с развитием здесь земледелия и животноводства.

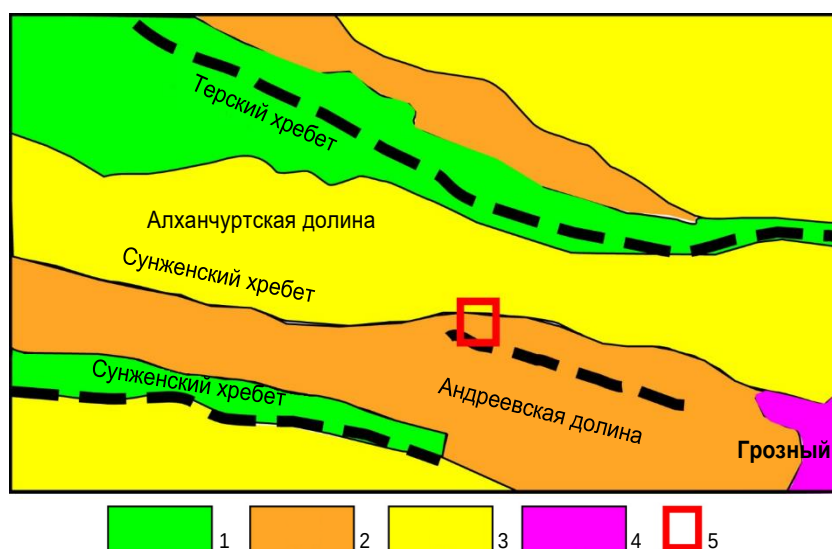


Рис. 3. Зональные типы ландшафтов:

1 – гребни, пригребневые поверхности и склоны передовых низкогорных хребтов; 2 – склоны отрогов передовых хребтов, переходящих в межгорные долины, сложенных неогеновыми отложениями из песчаников и глин; 3 – террасы и присклоновые поверхности межгорных долин; 4 – урбанизованные ареалы агломерации г. Грозного; 5 – скважина 11-Т месторождения термальных вод Гунюшки

Fig. 3. Landscape zonal types:

1 – ridges, near ridge surfaces and slopes of the front low-mountain ridges; 2 – slopes of front range offshoots going into intermountain valleys composed of Neogene deposits of sandstones and clays; 3 – terraces and near slope surfaces of intermountain valleys; 4 – urbanized areas of the Grozny agglomeration; 5 – 11-T Gunyushki geothermal well

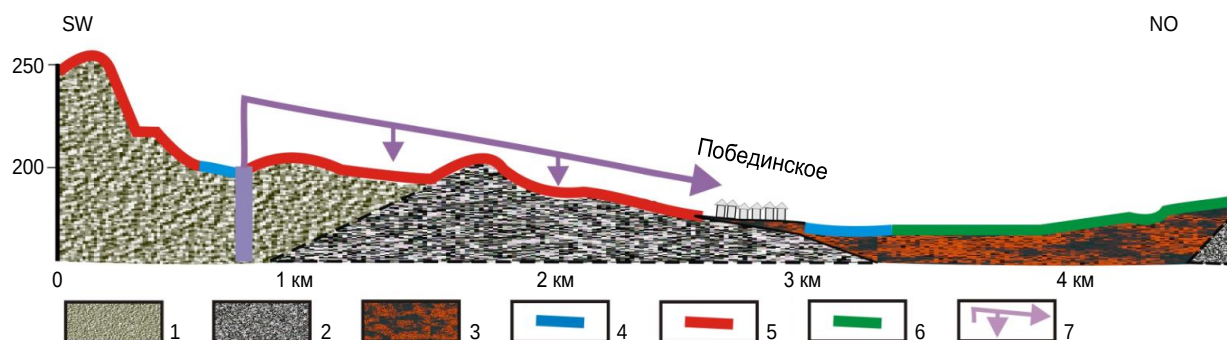


Рис. 4. Комплексный физико-географический профиль по линии Сунженский хребет – Алханчуртский канал через с. Побединское:

1 – плиоценовые акчагал-апшеронские отложения из песков, глин, конгломератов; 2 – миоценовые верхнесарматские отложения из тонкослоистых, реже песчанистых глин; 3 – четвертичные (нерасчлененные) отложения, аллювиально-пролювиальные глины, супеси, суглинки; 4 – водоемы; 5 – ландшафты пологих склонов отрогов Сунженского хребта, сложенных неогеновыми песчаниками и глинами; 6 – ландшафты террас и присклоновых поверхностей Алханчуртской долины; 7 – скважина 11-Т и продуктопровод

Fig. 4. Complex physical and geographical profile along the line of the Sunzha Range – Alkhanchurt Canal via the Pobedinskoe settlement:

1 – Pliocene Akchagyl-Apsheron deposits of sands, clays, conglomerates; 2 – Miocene Upper Sarmatian deposits of thin-layered, less often sandy clays; 3 – Quaternary (poorly defined) deposits, alluvial-proluvial clays, sandy loams, loam soils; 4 – reservoirs; 5 – landscapes of low gradient slopes of the Sunzha Range offshoot composed of Neogene sandstones and clays; 6 – landscapes of terraces and near slope surfaces of the Alkhanchurt valley; 7 – 11-T well and a product pipeline

Долговременное и интенсивное освоение территории привело к ее трансформации, при этом ландшафты межгорных долин испытали глубокую трансформацию рельефа в резуль-

тате нарезки полей, изменения водного режима вследствие прокладки каналов и обводнения, формирования пахотных горизонтов почв. Ландшафты склонов почти повсеместно

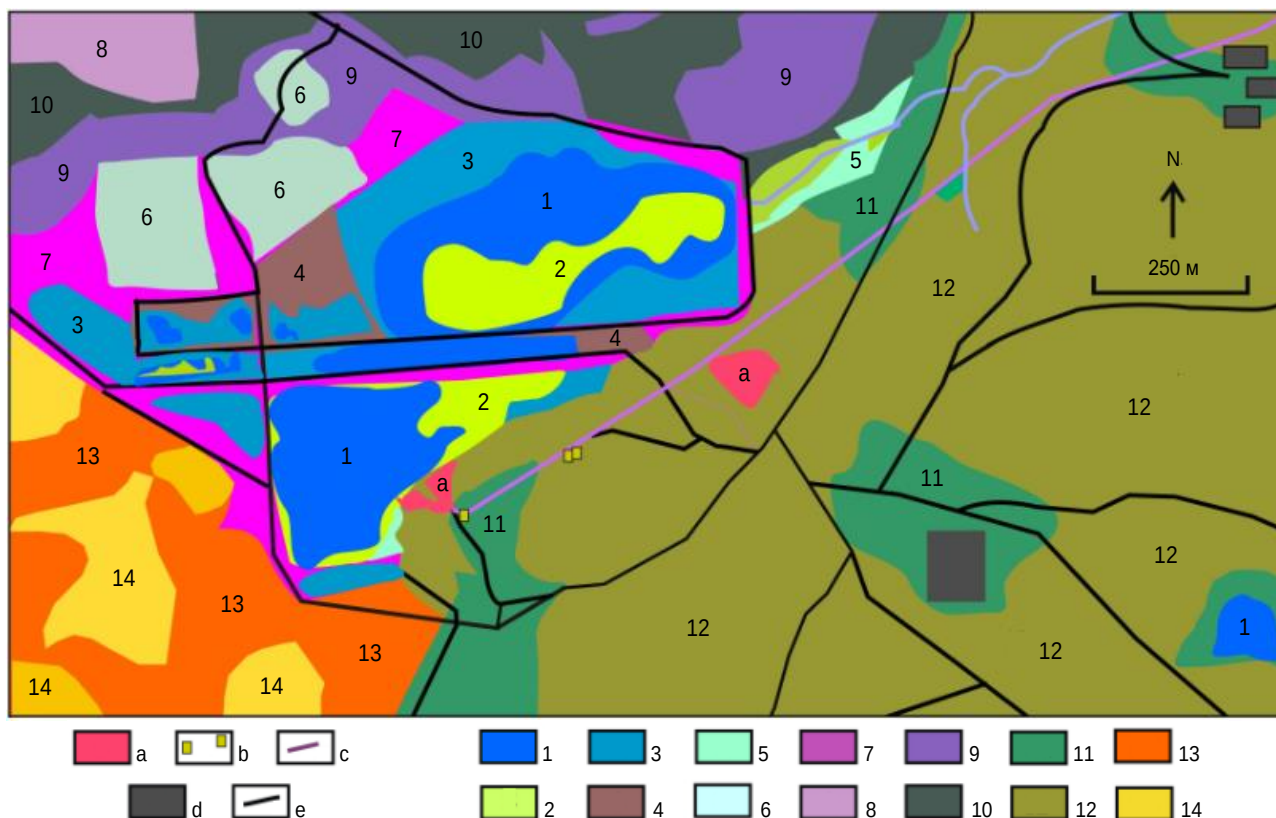


Рис. 5. Ландшафтная карта ареала скважины 11-Т Гунюшки:

Техногенные комплексы: а – скважина и ареал непосредственного теплового воздействия;

б – загоны для скота; с – кустарные ванночки бальнеологического назначения

(ныне заброшены); d – дороги; e – водопровод от скважины

1–6 – природно-антропогенные комплексы с коренными изменениями рельефа и водного режима: 1 – водоемы, 2 – заросли камыша, 3 – околотовные поверхности с редкой пионерной растительностью, 4 – заброшенные водоемы, ранее искусственно наполняемые, ныне с разреженным растительным покровом из осок и солянок на примитивных почвах с засолением, 5 – околотовные террасовидные поверхности с близким залеганием грунтовых вод, 6 – заброшенные водоемы, ранее искусственно наполняемые, с полупустынно-степной полынной растительностью с примесью солянок на примитивных каштановых почвах; 7, 8 – природно-антропогенные комплексы переходного типа, характеризующиеся естественной динамикой: 7 – склоны и поверхности, сложенные глинистыми отложениями, 8 – выположенная поверхность с фрагментами огородов и садов; 9–14: природно-антропогенные и природные комплексы с естественной динамикой: 9 – склоны южной экспозиции, пологие, сложенные глинистыми породами и суглинками, 10 – склоны южной экспозиции, пологие, сложенные глинистыми породами и суглинками, средне деградированные; 11 – выположенные поверхности, сложенные глинами и суглинками, с очагами эрозии, сильно деградированные, 12 – выположенные поверхности и пологие склоны, средне деградированные, 13 – склоны северной и северо-восточной экспозиции, сложенные глинами и суглинками, сильно деградированные, 14 – склоны северной и северо-восточной экспозиции, сложенные глинами и суглинками, средне деградированные

Fig. 5. Landscape map of the 11-T Gunyushki well area:

Technogenic complexes: a – a well and a direct thermal impact area; b – cattle pens;

c – hand-crafted balneological baths (now abandoned); d – roads; e – water conduit from a well

1–6 – natural-anthropogenic complexes featuring radical changes in relief and water regime: 1 – reservoirs, 2 – thickets of reeds, 3 – near-water surfaces with sparse pioneer vegetation, 4 – abandoned reservoirs previously artificially filled today featuring a sparse vegetation cover of sedges and saltworts on saline soils, 5 – near-water terrace-like surfaces with a close occurrence of groundwater, 6 – abandoned reservoirs previously artificially filled featuring semi-desert-steppe wormwood vegetation with an admixture of saltworts on primitive chestnut soils; 7, 8 – natural-anthropogenic complexes of a transitional type characterized by natural dynamics: 7 – slopes and surfaces composed of clay deposits, 8 – flattened surface with the fragments of vegetable gardens and orchards; 9–14 – natural-anthropogenic and natural complexes with natural dynamics: 9 – southern exposure slopes gently sloping, composed of clayey rocks and loams, 10 – southern exposure slopes gentle, composed of clayey rocks and loams, moderately degraded, 11 – flattened surfaces composed of clays and loams, with erosion centers, strongly degraded, 12 – flattened surfaces and gentle slopes, moderately degraded, 13 – slopes of northern and northeastern exposure composed of clays and loams, strongly degraded, 14 – slopes of northern and northeastern exposure composed of clays and loams, moderately degraded

испытали глубокую пастбищную дигрессию, следствием которой стало исчезновение кустарниковых лесостепей, развитие эрозии, стравленность и преобладание в травянистом покрове плохо поедаемых видов.

Как видно из высотного профиля, воды скважины на расстоянии 1,5 км направляются в с. Побединское. Здесь они используются только частично, а далее выливаются в водоем на северо-восточной окраине села (у кромки Алханчуртской долины) и дальше в Алханчуртский канал.

На ландшафтной карте ареал воздействия излившейся скважины 11-Т Гунюшки значительно увеличивается в направлении на север, где располагались каскады резервуаров воды, использованных в животноводстве.

На рис. 5 выделены следующие комплексы: техногенные; природно-антропогенные комплексы с коренными изменениями рельефа и водного режима; природно-антропогенные комплексы переходного типа, характеризующиеся естественной динамикой; природно-антропогенные и природные комплексы с естественной динамикой. Динамический ряд природных комплексов формируется под влиянием двух основных факторов: условий увлажнения и воздействий на почвенно-растительный покров, которые имеют антропогенное происхождение. Условия увлажнения меняются в зависимости от нахождения и перераспределения воды из скважины. Другой динамический ряд образуется под влия-

нием выпаса скота, чувствительность к которому изменяется в зависимости от крутизны и экспозиции склонов, удаленности от ското-прогонов и др.

Наиболее нарушены склоны южной экспозиции, примыкающие к ареалам, вовлеченным в интенсивное использование (свиноферма). Здесь склоны подверглись эрозии, на них сформировался относительно разреженный почвенно-растительный покров с полынно-злаковыми степями и полупустынно-степными комплексами на каштановых почвах. Наименее деградированы природные комплексы склонов северной и северо-восточной экспозиции, сложенных глинами и суглинками, под полынными степями, частично кустарниковыми по понижениям, на каштановых почвах. При снижении антропогенной нагрузки эти природные комплексы способны восстановиться до лесостепей.

Геоэкологическая оценка влияния скважины 11-Т Гунюшки на структуру и динамику ландшафтов. Скважина 11-Т Гунюшки находится в эксплуатации с 70-х гг. прошлого столетия. В результате аварии в стволе скважины на глубине 5 м (это основная масса воды в водоемах), а также разгерметизации устья скважины и пробоин на трубопроводе по естественному уклону рельефа вода стекает в углубления. По мере заполнения первого водоема вода через трубу, проложенную под дорогой, течет в другие и далее через село в Алханчуртский канал (рис. 6).



Рис. 6. Техногенный водоем
Fig. 6. Technogenic reservoir



Вода относится к слабоминерализованной, тем не менее при нарушении герметичности оборудование быстро выходит из строя. Издержки, связанные с содержанием и эксплуатацией скважинного оборудования и трубопровода, осуществляются за счет потребителей (объекты инфраструктуры с. Побединского и частный сектор). Вся прискважинная территория захламлена мусором и различными приспособлениями для кустарничковых ванн, саун и т. д., стоки которых являются одним из источников загрязнения водоемов.

Как отмечалось выше, длительное антропогенное воздействие привело к образованию новых природно-антропогенных и техногенных комплексов с коренными изменениями рельефа и водного режима. В целом антропогенное воздействие определяется как «сумма прямых и опосредованных (косвенных) влияний на окружающую среду»¹. Прямому антропогенному воздействию подвержен участок с площадью более 17 га (ландшафты 1–3, рис. 5), косвенному – участок с площадью более 9 га (ландшафты 4–8, рис. 5). На природно-антропогенные и природные комплексы с естественной динамикой, состояние которых характеризуется как сильно- и среднедеградированное, приходится около 100 га (ландшафты 9–14, рис. 5). Таким образом, в результате наложения двух основных факторов (увлажнение и воздействие на почвенно-растительный покров) в общей сложности из

сельскохозяйственного оборота изъято более 120 га плодородных земель [16].

Помимо естественных природных факторов (давление, температура, инсоляция) для районов с изливающимися геотермальными скважинами в целом характерно тепловое загрязнение и изменение микроклимата, то есть формирование особых климатических условий, которые обуславливают специфичность животного и растительного сообществ. Например, распыление воды в результате излива геотермальных скважин влияет на влажность воздуха и температуру и ведет к переувлажнению прилегающей территории вплоть до заболачивания (рис. 7).

С целью исследования флоры в зоне излива термальных вод из скважины 11-Т Гунюшки в начале осени 2020 и 2021 гг. (конец периода вегетации) велись флористические наблюдения. Маршрут был проложен с учетом рельефа и уровня воздействия изливающейся термальной воды на ландшафты. Для сравнительного анализа были выбраны два профиля: первый – непосредственно в зоне воздействия изливающейся скважины, второй – контрольный (рис. 8).

На первый взгляд в зоне воздействия скважины 11-Т Гунюшки визуально уже прослеживается изменение видового состава растений: если чуть западнее скважины, где абсолютная отметка рельефа отличается всего лишь на 2 м, присутствуют ковыль, типчак, тонконог,



Рис. 7. Заболоченные участки
Fig. 7. Boggy areas

¹ Реймерс Н. Ф. Природопользование: словарь-справочник. М.: Мысль, 1990. 637 с.



Рис. 8. Карта-схема полевых исследований:

1 – скважина 11-Т Гунюшки; 2 – точки заложения трансект; 3 – профили исследований

Fig. 8. Index map of field research:

1 – 11-T Gunyushki well; 2 – transect laying points; 3 – research profiles

то непосредственно в зоне влияния скважины с увеличением гидроморфности почв появляются устойчивые к теплу и влаге рогаз, осока, багульник, вереск, стрелолист и др., то есть снижаются доли гликофитов и увеличиваются доли гидрофитов. Геоботанические исследования проводились с выделением основных фитоценозов, в отдельных точках которых закладывались трансекты (1 м²) и определялись доминирующие ассоциации, количество доминантов, общее проективное покрытие (табл. 1).

В целом вся флора Сунженского хребта представлена более чем 260 видами цветковых растений, относящимися к 157 родам и 43 семействам. На профиле I флора представлена 15 видами цветковых растений, относящимися к 14 родам и 11 семействам, на контрольном профиле II видового разнообразия чуть больше: здесь имеется более 25 видов

растений, относящихся к 20 родам и 18 семействам.

Анализ полученных данных свидетельствует о том, что по профилю I на трансектах ближе к водоему и скважине (№ 1-4, 6, рис. 8) снижаются показатели проективного покрытия, видового состава, флористического сходства с фоновыми сообществами, тогда как на контрольном профиле II угнетение растительности наблюдается на трансектах, которые подходят близко к продуктопроводу (с повышением температуры увеличивается испарение) и дорогам.

Отсутствие древесного подроста, кустарничков, характерных для природной зоны степей и лесостепей, привело к изменению комплекса абиотических факторов (влажность воздуха, температура, освещенность), это сопровождается формированием заболоченного

Таблица 1. Геоботаническое описание трансект
Table 1. Geobotanical description of transects

Профиль	Параметр	Номер трансекты							
		1	2	3	4	5	6	7	8
I	Проективное покрытие, %	5	10	30	40	55	30	70	50
	Количество видов	1	2	3	3	4	2	1	2
II	Проективное покрытие, %	60	60	55	30	60	70	60	50
	Количество видов	4	4	2	2	5	4	4	3



сообщества с высокой плотностью проективного покрытия (до 70 %) и доминированием одного вида (тростник обыкновенный *Phragmites australis* Cav.), который одновременно является и гидрофитом, и галофитом. Кроме него на заболоченных участках встречаются заросли камыша (камыш лесной *Scirpus sylvaticus* L.), которые выдерживают сильное увлажнение, высокие температуры, засоление почв.

Также с помощью ресурса Google Earth Engine² была выявлена временная динамика площадных нарушений. Дешифрирование космоснимков за период 2005–2021 гг. показало признаки значительного угнетения растительных сообществ и увеличение площади деградируемых земель, особенно начиная с 2010 г. Возможно, это связано с усилением сельскохозяйственного использования территории: стало возрождаться сельское хозяйство, появились молочнотоварные фермы, увеличилось поголовье скота. В зоне макси-

мального воздействия, непосредственно прилегающей к скважине и техногенным водоемам, наблюдается существенная трансформация естественных растительных сообществ вплоть до их полного исчезновения.

Лабораторно-аналитические исследования проб воды из скважины и техногенных водоемов свидетельствуют о том, что содержание всех исследуемых показателей – свинца, кадмия, цинка, хлорид-, нитрит-, сульфат-, нитрат-ионов, хрома, общего железа, хлоридов, перманганатной окисляемости, сухого остатка, биохимического потребления кислорода (на основе анализа, проводимого в течение 5 суток) – незначительно или вообще не превышает значения предельно допустимых концентраций (табл. 2), что свидетельствует о неплохом качестве воды и возможностях ее использования в хозяйстве. Согласно Нормативам качества воды водных объектов рыбохозяйственного значения³, в анализах проб

Таблица 2. Результаты химических анализов проб воды из скважины и техногенных водоемов
Table 2. Results of chemical analyses of water samples from a well and technogenic reservoirs

Определяемые показатели, единицы измерения	Норматив качества (ПДК, ПДС, ПДВ)*	Результаты анализа ± Δ			
		Точка 1	Точка 2	Точка 3	Скважина 11-Т
Аммоний-ионы, мг/дм ³	2	1,2 ± 0,3	4,8 ± 0,4	1,2 ± 0,3	1,8 ± 0,4
Запах, балл	Не более 2	0	0	0	1
Хром, мг/дм ³	Отсутствует	–	–	–	–
Нитрит-ионы, мг/дм ³	3,3	0,18 ± 0,03	0,16 ± 0,02	0,2 ± 0,04	< 0,003
Нитрат-ионы, мг/дм ³	45	0,72 ± 0,012	1,2 ± 0,2	1 ± 0,2	< 0,1
Общее железо, мг/дм ³	0,3	0,17 ± 0,04	0,14 ± 0,03	0,24 ± 0,05	< 0,05
Общая щелочность, мг/дм ³	–	16,5 ± 1,9	15,5 ± 1,9	19 ± 0,2	8,7 ± 1
Водородный показатель, ед. pH	8,5	8,8 ± 0,2	8,8 ± 0,8	8,8 ± 0,2	8,1 ± 0,2
Хлориды, мг/дм ³	350	451,9 ± 0,2	425,4 ± 38,2	540,6 ± 48,6	265,8 ± 23,9
Сульфат-ионы, мг/дм ³	500	693 ± 103,9	659 ± 98,9	453 ± 67,9	210,6 ± 25,3
Окисляемость перманганатная, мг/дм ³	Не более 5	2,5 ± 0,2	8,8 ± 0,8	8,4 ± 0,8	2,4 ± 0,2
Сухой остаток, мг/дм ³	1000	1350 ± 121,5	1495 ± 134,5	1643 ± 147,8	907,4 ± 81,6
БПК ₅ ** ³ , мг О ₂ /дм ³	Не более 4	3,9 ± 1	6 ± 1,5	4,2 ± 1,1	–
Свинец, мг/дм ³	0,03	< 0,001	< 0,001	< 0,001	–
Кадмий, мг/дм ³	0,001	< 0,0005	< 0,0005	< 0,0005	–
Цинк, мг/дм ³	1	< 0,01	< 0,01	< 0,01	–

Примечание: * ПДК – предельно допустимая концентрация вредных веществ; ПДС – предельно допустимый сброс вредных веществ; ПДВ – предельно допустимый выброс вредных веществ. ** БПК₅ – биохимическое потребление кислорода на основе анализа, проводимого в течение 5 суток.

² Google Earth Engine [Электронный ресурс]. URL: <https://earthengine.google.com/timelapse> (11.05.2022).

³ Об утверждении нормативов качества воды водных объектов рыбохозяйственного значения, в том числе нормативов предельно допустимых концентраций вредных веществ в водах водных объектов рыбохозяйственного значения: приказ Министерство сельского хозяйства Российской Федерации от 13 декабря 2016 г. [Электронный ресурс]. URL: <https://docs.cntd.ru/document/420389120> (11.05.2022).



воды из данных водоемов не зафиксировано превышения рыбохозяйственных предельно допустимых концентраций ни по одному показателю и она вполне пригодна для рыборазведения. Вода имеет зеленый цвет (хлоrellла), что говорит о хорошей продуктивности живущих в ней организмов.

Химический анализ почв показал, что они характеризуются сильнощелочной реакцией, значения водородного показателя изменяются в пределах 8,9–9,7 (табл. 3). Такие почвы в основном имеют низкое плодородие, неблагоприятные физические свойства, химический состав и т. д., в них растет подвижность катионообразующих металлов (цинк, медь, свинец и др.). Содержание органических веществ в почвах незначительно и находится в диапазоне 0,8–2,9 % от массы. На основании этих данных можно сделать вывод, что в районе излива термальных вод скважины 11-Т Гунюшки есть предпосылки для накопления в почвах тяжелых металлов [17, 18].

Перевыпас скота, нарушение почвенного покрова в результате систематического использования прогонных троп привели к появлению язв дефляции, в связи с чем на сегодняшний день первоочередной становится задача упорядочения режима выпаса скота вплоть до внедрения пастбищеоборота.

На основе ландшафтной карты и других данных (орографии рельефа, геологического строения, почвенного покрова, биоты и пр.) составлена карта-схема геоэкологического зонирования исследуемой территории, отра-

жающая экологическое состояние каждой из зон сквозь призму современных факторов антропогенного воздействия на природную среду (рис. 9). На ней выделено несколько зон воздействия, в частности прямое сильное воздействие, косвенное сильное и косвенное слабое. Анализ данной карты свидетельствует о том, что большая часть территории (79 %) находится в зоне косвенного слабого воздействия основных факторов формирования природных комплексов и не вызывает больших опасений на современном уровне развития традиционного природопользования в данном районе. Вместе с тем, на той части территории, где резко выделяются очаги прямого сильного (13,5 %) и косвенного сильного (7,14 %) уровня экологической напряженности, должны проводиться рекультивационные мероприятия по восстановлению ландшафтов.

Заключение

Таким образом, ареал воздействия изливающихся термальных вод из скважины 11-Т Гунюшки затрагивает два основных типа ландшафтов: склоны отрогов передовых хребтов, переходящих в межгорные долины, и террасы и присклоновые поверхности межгорных долин. Интенсивное освоение привело к их глубокой трансформации вплоть до исчезновения кустарниковых лесостепей. Типичная для степной зоны полынно-злаковая растительность местами деградирована до полупустынной, в травянистом покрове преобладают плохо поедаемые виды, развита эрозия.

Таблица 3. Результаты химических анализов проб верхнего слоя почв (0–20 см)

Table 3. Results of chemical analyses of soil upper layer samples (0–20 cm)

Определяемые показатели, единицы измерения	Норматив качества (ПДК, ПДС, ПДВ)*	Результаты анализа $\pm \Delta$		
		Точка 1	Точка 2	Точка 3
Водородный показатель, ед. pH	–	9,7 $\pm$ 0,1	8,9 $\pm$ 0,1	9,4 $\pm$ 0,1
Органическое вещество, %	–	2,9 $\pm$ 0,58	2,40 $\pm$ 0,48	0,80 $\pm$ 0,16
Медь, мг/кг	132	< 1	< 1	< 1
Цинк, мг/кг	220	< 1	< 1	< 1
Свинец, мг/кг	130	< 0,5	< 0,5	< 0,5
Кадмий, мг/кг	2	< 0,1	< 0,1	< 0,1
Мышьяк, мг/кг	10	< 0,1	0,317 $\pm$ 0,127	< 0,1
Ртуть, мг/кг	2,1	0,194 $\pm$ 0,097	0,342 $\pm$ 0,171	0,275 $\pm$ 0,171
Никель, мг/кг	80	< 0,5	< 0,5	< 0,5
Кобальт, мг/кг	5–10	< 0,5	< 0,5	< 0,5
Нефтепродукты, мг/кг	100–500	201,5 $\pm$ 50,4	< 50	< 50

Примечание: * Условные обозначения те же, что и в табл. 2.

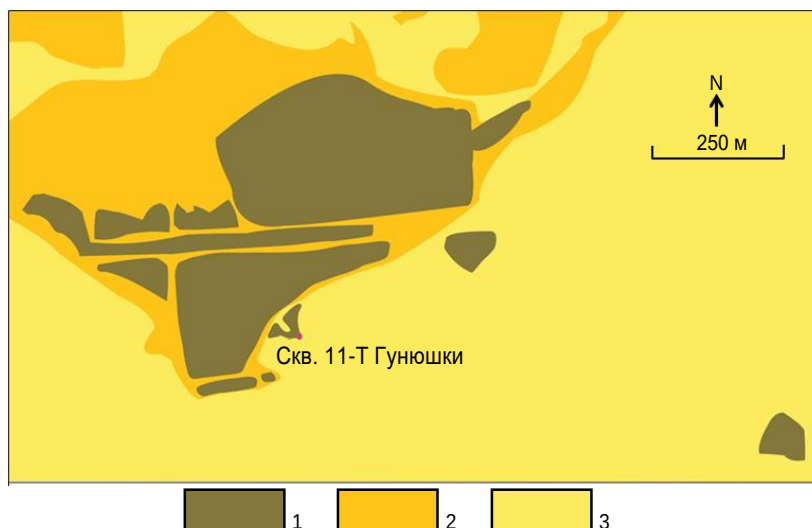


Рис. 9. Карта-схема геоэкологического зонирования ареала воздействия скважины 11-Т Гунюшки

Зоны воздействия: 1 – прямое сильное; 2 – косвенное сильное; 3 – косвенное слабое

Fig. 9. Index map of geoeological zoning of the impact area of 11-T Gunyushki well

Impact zones: 1 – strong direct impact; 2 – strong indirect impact; 3 – weak indirect impact

Большая часть исследуемой территории (79 %) находится в зоне косвенного слабого воздействия основных факторов формирования природных комплексов и не вызывает серьезных опасений на современном уровне развития традиционного природопользования в данном районе. Тем не менее в очагах прямого сильного (13,5 %) и косвенного сильного (7,14 %) уровня экологической напряженности следует проводить рекультивационные мероприятия по восстановлению ландшафтов.

На сегодняшний день вода из скважины 11-Т Гунюшки используется в качестве питьевой воды для скота, для кустарных ванн, а также для удовлетворения хозяйственно-бытовых нужд различных объектов инфраструктуры и частного сектора с. Побединского (в основном для технических целей). Химические анализы воды свидетельствуют о перспективных возможностях ее использования в хозяйстве, например, без особых затрат возможно реализовать рыборазведение, вода пригодна для горячего водоснабжения, теплоснабжения и т. д. Данный спектр может быть расширен при условии использования более совершенных технологий разработки термальных вод.

Нерегулируемая и интенсивная эксплуатация геотермальных скважин может привести к деградации месторождения, истощению дебита, снижению температуры воды. Разлив термальных вод даже небольшой минерали-

зации вызывает засоление почвенных горизонтов и в конечном итоге приводит к нарушению гидрохимического режима грунтовых вод и почв, ухудшению качества вод горизонтов, служащих источниками питьевого водоснабжения. Нарушение уже сложившегося режима функционирования геотермальных скважин приведет к невозможности разведения скота в этом районе в нынешних масштабах. С другой стороны, чрезмерный выпас скота, увеличение количества прогонных троп уже привели к деградации почвенно-растительного покрова. Решение этой проблемы видится в комплексной оптимизации освоения данного месторождения термальных вод: улучшении контроля за использованием вод, мониторинге утечек, моделировании и прогнозировании негативных процессов, создании участков и комплексов для искусственного пополнения запасов подземных вод, нормировании пастбищного скотоводства. В случае снижения антропогенной нагрузки образовавшиеся природные комплексы способны восстановиться до лесостепей (что доказывает ситуация с некоторыми вышерасположенными участками склонов северной экспозиции Сунженского хребта).

Перспективу энергетики Чеченской Республики в будущем связывают с нетрадиционными источниками энергии, прежде всего с геотермальными ресурсами [19]. Оценка воздействия существующих геотермальных объектов на окружающую среду на раннем этапе



освоения поможет понять масштабы и глубину последствий и разработать более эффективные рекомендации по совершенствованию освоения геотермальных ресурсов.

Длительное использование природных ресурсов в том виде, в каком оно осуществлялось и осуществляется поныне на территории Чеченской Республики, сопровождается нара-

станием экологических проблем, угроз и рисков для ландшафтов и населения этого региона. Реальные достижения в области энергетической и экологической безопасности появятся только в результате понимания властью, собственниками бизнеса и гражданским обществом выгоды учета и управления природными рисками [20, 21].

Список источников

1. Дворов И. М. Геотермальная энергетика. М.: Наука, 1976. 192 с.
2. Белоусов В. И., Белоусова С. П. Природные катастрофы и экологические риски (на примере развития геотермальной энергетики). Петропавловск-Камчатский: Изд-во КГПУ, 2002. 157 с.
3. Алхасов А. Б. Геотермальная энергетика: проблемы, ресурсы, технологии. М.: Физматлит, 2008. 375 с.
4. Перминов Э. М. К вопросу о состоянии и перспективах развития мировой возобновляемой энергетики // Энергетик. 2018. № 11. С. 38–43.
5. Сухарев Г. М., Мирошников М. В. Подземные воды нефтяных и газовых месторождений Кавказа. М.: Гостехиздат, 1963. 328 с.
6. Курбанов М. К. Геотермальные и гидроминеральные ресурсы Восточного Кавказа и Предкавказья. М.: Наука – МАИК, 2001. 259 с.
7. Керимов И. А., Даукаев А. А., Абумуслимов А. А., Даукаев А. А. К истории изучения минеральных и целебных вод на территории Чеченской Республики // Вестник Академии наук Чеченской Республики. 2012. № 1. С. 59–64.
8. Hou H. Environmental impact of geothermal development in Henan province, China // Geothermal Training Programme. 2003. Report no. 11. P. 253–274.
9. Li J. Environmental impact of geothermal development in Tianjin, China // Geothermal Training Programme. 2004. Report no. 9. P. 159–182.
10. Svalova V. B. Geothermal resources of Russia and their complex utilization // Proceedings of Australian Geothermal Energy Conference 2011. Melbourne, 2011. P. 251–258.
11. Bayer P., Rybach L., Blum P., Brauchler R. Review on life cycle environmental effects of geothermal power generation // Renewable and Sustainable Energy Reviews. 2013. Vol. 26. P. 446–463. <https://doi.org/10.1016/j.rser.2013.05.039>.
12. Bošnjaković M., Stojkov M., Jurjević M. Environmental Impact of Geothermal Power Plants // Tehnički vjesnik. 2019. Vol. 26. Iss. 5. P. 1515–1522. <https://doi.org/10.17559/TV-20180829122640>.
13. Шулюпин А. Н., Варламова Н. Н. Современные тенденции в освоении геотермальных ресурсов // Георесурсы. 2020. Т. 22. № 4. С. 113–122. <https://doi.org/10.18599/grs.2020.4.113-122>.
14. Гацаева Л. С. Геоэкологические проблемы освоения геотермальных ресурсов Чеченской Республики // Грозненский естественнонаучный бюллетень. 2017. № 3. С. 17–21.
15. Дикаев Р. С., Батукаев А. А., Масаров И. Р. Геотермальные месторождения Чеченской Республики. Современное состояние // Передовые научные исследования: опыт и актуальные вопросы: сб. докл. Междунар. науч.-практ. конф. СПб., 2019. С. 25–38.
16. Гацаева Л. С., Гуня А. Н., Керимов И. А. Геоэкологическая оценка влияния геотермальных скважин на ландшафт (на примере месторождения Гунюшки Чеченской Республики) // Грозненский естественнонаучный бюллетень. 2022. Т. 7. № 2. С. 18–31. <https://doi.org/10.25744/genb.2022.94.48.003>.
17. Гацаева Л. С., Керимов И. А., Махмудова Л. Ш. Геоэкологические проблемы месторождения термальных вод Гунюшки // Известия Дагестанского государственного педагогического университета. Естественные и точные науки. 2021. Т. 15. № 2. С. 63–74. <https://doi.org/10.31161/1995-0675-2021-15-2-63-74>.
18. Гацаева Л. С. Геохимический анализ качества термальной воды (на примере месторождения термальных вод Гунюшки) // Вестник Комплексного научно-исследовательского института им. Х. И. Ибрагимова Российской академии наук. 2021. № 4. С. 84–96. <https://doi.org/10.34824/VKNIIRAN.2021.8.4.008>.
19. Kerimov I. A., Mintsaeв M. Sh., Debiev M. V., Pashaev M. Ya. Basic stages of energy development program implementation in the Chechen Republic // International Journal of Energy Economics and Policy. 2020. Vol. 10. Iss. 6. P. 502–509. <https://doi.org/10.32479/ijeep.10492>.
20. Гинзбург А. С., Кекелидзе Г. Н., Шнипко Н. В. Климатические ресурсы – основа устойчивого развития возобновляемой энергетики // Грозненский естественнонаучный бюллетень. 2018. Т. 3. № 2. С. 7–15. <https://doi.org/10.25744/genb.2018.10.2.001>.
21. Кочуров Б. И., Забураева Х. Ш., Керимов И. А., Эльдаров Э. М., Гайрабеков У. Т., Ивашкина И. В. [и др.]. Современные проблемы природопользования на Северном Кавказе и пути их решения // Грозненский естественнонаучный бюллетень. 2018. Т. 3. № 3. С. 29–35. <https://doi.org/10.25744/genb.2018.11.3.004>.

References

1. Dvorov I. M. *Geothermal energy*. Moscow: Nauka; 1976. 192 p. (In Russ.).
2. Belousov V. I., Belousova S. P. *Natural disasters and environmental risks (for the case of geothermal energy*



development). Petropavlovsk-Kamchatsky: Kamchatka State Pedagogical University; 2002. 157 p. (In Russ.).

3. Alkhasov A. B. *Geothermal energy: problems, resources, technologies*. Moscow: Fizmatlit; 2008. 375 p. (In Russ.).

4. Perminov E. M. On the state and prospects of development world renewable energy. *Energetik*. 2018;11:38-43. (In Russ.).

5. Sukharev G. M., Miroshnikov M. V. *Underground waters of the Caucasus oil and gas fields*. Moscow: Gostoptekhizdat; 1963. 328 p. (In Russ.).

6. Kurbanov M. K. *Geothermal and hydromineral resources of the Eastern Caucasus and Ciscaucasia*. Moscow: Nauka – MAIK; 2001. 259 p. (In Russ.).

7. Kerimov I. A., Daukaev A. A., Abumuslimov A. A., Daukaev A. A. On the history of mineral and healing water studies on the territory of the Chechen Republic. *Vestnik Akademii nauk Chechenskoi Respubliki*. 2012;1:59-64. (In Russ.).

8. Hou H. Environmental impact of geothermal development in Henan province, China. *Geothermal Training Programme*. 2003;11:253-274.

9. Li J. Environmental impact of geothermal development in Tianjin, China. *Geothermal Training Programme*. 2004;9:159-182.

10. Svalova V. B. Geothermal resources of Russia and their complex utilization. *Proceedings of Australian Geothermal Energy Conference 2011*. Melbourne; 2011, p. 251–258.

11. Bayer P., Rybach L., Blum P., Brauchler R. Review on life cycle environmental effects of geothermal power generation. *Renewable and Sustainable Energy Reviews*. 2013;26:446-463. <https://doi.org/10.1016/j.rser.2013.05.039>.

12. Bošnjaković M., Stojkov M., Jurjević M. Environmental Impact of Geothermal Power Plants. *Tehnički vjesnik = Technical gazette*. 2019;26(5):1515-1522. <https://doi.org/10.17559/TV-20180829122640>.

13. Shulyupin A. N., Varlamova N. N. Current trends in the development of geothermal resources. *Georesursy = Georesources*. 2020;22(4):113-122. <https://doi.org/10.18599/grs.2020.4.113-122>.

14. Gatsaeva L. S. Geoecological problems of geothermal resources development in the Chechen Republic. *Groznenskii estestvennonauchnyi byulleten' = Grozny Natural Science Bulletin*. 2017;3:17-21. (In Russ.).

ral Science Bulletin. 2017;3:17-21. (In Russ.).

15. Dikaev R. S., Batukaev A. A., Masarov I. R. Geothermal deposits of the Chechen Republic. Current state. In: *Peredovye nauchnye issledovaniya: opyt i aktual'nye voprosy: sb. dokl. Mezhdunar. nauch.-prakt. konf. = Advanced scientific studies: experience and challenging issues: collection of reports of the International scientific and practical conference*. Saint Petersburg; 2019, p. 25–38. (In Russ.).

16. Gatsaeva L. S., Gunya A. N., Kerimov I. A. Geoecological impact assessment geothermal wells on landscape (by the example of the Gunyushki deposit of the Chechen Republic. *Groznenskii estestvennonauchnyi byulleten' = Grozny Natural Science Bulletin*. 2022;7(2): 18-31. <https://doi.org/10.25744/genb.2022.94.48.003>.

17. Gatsaeva L. S., Kerimov I. A., Makhmudova L. Sh. Geoecological problems of Gunyushki thermal water deposit. *Izvestiya Dagestanskogo gosudarstvennogo pedagogicheskogo universiteta. Estestvennye i tochnye nauki = Dagestan State Pedagogical University Journal. Natural and Exact Sciences*. 2021;15(2):63-74. (In Russ.). <https://doi.org/10.31161/1995-0675-2021-15-2-63-74>.

18. Gatsaeva L. S. Geochemical analysis of thermal water quality (on the example of the Gunyushka thermal water deposit). *Vestnik Kompleksnogo nauchno-issledovatel'skogo instituta im. Kh. I. Ibragimova Rossiiskoi akademii nauk*. 2021;4:84-96. (In Russ.). <https://doi.org/10.34824/VKNIIRAN.2021.8.4.008>.

19. Kerimov I. A., Mintsaev M. Sh., Debiev M. V., Pashaev M. Ya. Basic stages of energy development program implementation in the Chechen Republic. *International Journal of Energy Economics and Policy*. 2020;10(6):502-509. <https://doi.org/10.32479/ijee.10492>.

20. Ginzburg A. S., Kekelidze G. N., Shnipko N. V. Climatic resources – the basis for sustainable development of renewable energetics. *Groznenskii estestvennonauchnyi byulleten' = Grozny Natural Science Bulletin*. 2018;3(2):7-15. (In Russ.). <https://doi.org/10.25744/genb.2018.10.2.001>.

21. Kochurov B. I., Zaburaeva Kh. Sh., Kerimov I. A., Eldarov E. M., Gayrabekov U. T., Ivashkina I. V., et al. Modern problems of environmental management in the North Caucasus and the way of their decision. *Groznenskii estestvennonauchnyi byulleten' = Grozny Natural Science Bulletin*. 2018;3(3):29-35. (In Russ.). <https://doi.org/10.25744/genb.2018.11.3.004>.

Информация об авторах / Information about the authors



Гацаева Лиана Саидовна,

научный сотрудник отдела проблем топливно-энергетического комплекса, Комплексный научно-исследовательский институт им. Х. И. Ибрагимова РАН, г. Грозный, Россия, gls69@yandex.ru, <https://orcid.org/0000-0002-5142-4255>.

Liana S. Gatsaeva,

Researcher of the Department of Problems of the Fuel and Energy Complex, Kh. Ibragimov Complex Research Institute RAS, Grozny, Russia, gls69@yandex.ru, <https://orcid.org/0000-0002-5142-4255>.



Гуня Алексей Николаевич,
доктор географических наук, профессор,
ведущий научный сотрудник отдела физической географии
и проблем природопользования,
Институт географии РАН,
г. Москва, Россия,
a.n.gunya@igras.ru,
<https://orcid.org/0000-0002-9255-1592>.
Aleksey N. Gunya,
Dr. Sci. (Geograph.), Professor,
Leading Researcher of the Department of Physical Geography
and Environmental Problems,
Institute of Geography RAS,
Moscow, Russia,
a.n.gunya@igras.ru,
<https://orcid.org/0000-0002-9255-1592>.



Керимов Ибрагим Ахмедович,
доктор физико-математических наук,
главный научный сотрудник отдела истории наук о Земле,
Институт истории естествознания и техники им. С. И. Вавилова РАН,
г. Москва, Россия,
ibragim_kerimov@mail.ru,
<https://orcid.org/0000-0002-2981-7255>.
Ibragim A. Kerimov,
Dr. Sci. (Phys. & Math.),
Chief Researcher of the Department of the History of Earth Sciences,
S. I. Vavilov Institute for the History of Science and Technology RAS,
Moscow, Russia,
ibragim_kerimov@mail.ru,
<https://orcid.org/0000-0002-2981-7255>.

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 20.05.2022; одобрена после рецензирования 07.10.2022; принята к публикации 14.11.2022.

The article was submitted 20.05.2022; approved after reviewing 07.10.2022; accepted for publication 14.11.2022.



ГИДРОГЕОЛОГИЯ И ИНЖЕНЕРНАЯ ГЕОЛОГИЯ

Научная статья

УДК 550.3+551.34

<https://doi.org/10.21285/2686-9993-2022-45-4-408-423>**Гидротермические условия почвы южного и северного склонов северо-восточного Дасинъаньлина, Китай****Мяо Юй^а, Надежда Анатольевна Павлова^б, Чанлэй Дай^с**^аСеверо-Восточный федеральный университет им. М. К. Аммосова, г. Якутск, Россия^бИнститут мерзлотоведения им П. И. Мельникова СО РАН, г. Якутск, Россия^сХэйлуцзянский университет, г. Харбин, Китай

Автор, ответственный за переписку: Павлова Надежда Анатольевна, pavlova@mpi.ysn.ru

Резюме. Цель представленного исследования состояла в изучении особенностей влияния полярно ориентированных склонов на приповерхностный энергетический и гидротермический баланс в области сезонной криолитозоны. Авторами был проведен комплекс полевых исследований, включающий наблюдения за температурой воздуха и подстилающей поверхностью, влажностью грунтов, солнечной радиацией и скоростью ветра на гидрологических станциях Сунлин (южный склон) и Логухэ (северный склон) в северо-восточной части горной системы Дасинъаньлин (Китай). Анализ полученных материалов позволил установить, что, с одной стороны, долгосрочное влияние составляющих теплового баланса приводит к значительным отличиям структуры грунта и его свойств на разноориентированных склонах. Количество суточных циклов промерзания – оттаивания почвы на южном склоне (100 циклов) значительно превышает их на северном (56 циклов). Почва на южном склоне теплее, чем на северном на 3 °С, а ее влажность в районе станции Сунлин ниже, чем на станции Логухэ. С другой стороны, различия свойств почвы контролируют энергообмен между атмосферой и поверхностью земли, в результате чего поступающая солнечная коротковолновая радиация и тепловой поток в почву на южном склоне больше, чем на северном. Таким образом, ориентация склонов является одним из существенных экологических факторов, влияющих на поступление солнечной энергии, температуру и влажность грунтов северо-восточной части гор Дасинъаньлин, а также играет решающую роль в пространственном распределении и эволюции сезонной мерзлоты в регионе и, соответственно, влияет на устойчивость и безопасность инженерных сооружений. Выполненное исследование имеет важное значение для понимания взаимосвязи климата и мерзлоты в горных районах сезонной криолитозоны и оптимизации граничных условий при моделировании процессов промерзания – протаивания горных пород.

Ключевые слова: экспозиция склона, поверхностные гидротермальные процессы, режимные наблюдения и количественный анализ, сезонная мерзлота, Дасинъаньлин

Для цитирования: Юй Мяо, Павлова Н. А., Дай Чанлэй. Гидротермические условия почвы южного и северного склонов северо-восточного Дасинъаньлина, Китай // Науки о Земле и недропользование. 2022. Т. 45. № 4. С. 408–423. <https://doi.org/10.21285/2686-9993-2022-45-4-408-423>.

HYDROGEOLOGY AND ENGINEERING GEOLOGY

Original article

Hydrothermal conditions of southern and northern slope soils of northeastern Great Xing'an Mountain, China**Miao Yu^a, Nadezhda A. Pavlova^b, Changlei Dai^c**^aAmmosov North-Eastern Federal University, Yakutsk, Russia^bMelnikov Permafrost Institute SB RAS, Yakutsk, Russia^cHeilongjiang University, Harbin, China

Corresponding author: Nadezhda A. Pavlova, pavlova@mpi.ysn.ru

Abstract. The purpose of the article is to study the influence features of polar-oriented slopes on the near-surface energy and hydrothermal balance in the seasonal cryolithozone. The authors carried out a complex of field observations including

© Юй Мяо, Павлова Н. А., Дай Чанлэй, 2022



measurement of air and underlying surface temperature, soil moisture, solar radiation and wind speed at the hydrological stations of Songling (southern slope) and Luoguhe (northern slope) in the northeast of the Great Xing'an Mountain (China). The analysis of the data obtained allowed to conclude that, on the one hand, the long-term influence of the thermal balance components causes significant differences in the soil structure and properties on differently oriented slopes. The number of daily freeze-thaw soil cycles on the southern slope (100 cycles) significantly exceeds the ones on the northern slope (56 cycles). The soil on the southern soil is 3 °C warmer than that on the northern slope, and its humidity in the area of the Songling hydrological station is lower than that at the Luoguhe station. On the other hand, differences in soil properties control the energy exchange between the atmosphere and the earth's surface, this means that the incoming short-wave solar radiation and heat flux into the soil on the southern slope is greater than on the northern one. Therefore, slope orientation is one of the significant environmental factors affecting the influx of solar energy, temperature and humidity of the soils in the northeastern Great Xing'an Mountain. It also has a decisive role for the spatial distribution and evolution of seasonal permafrost in the region and, accordingly, affects the stability and safety of engineering structures. The performed research is important for understanding the relationship between climate and frozen soil in the mountainous areas with seasonal cryolithozone as well as for optimization of boundary conditions when modeling rock freeze-thaw processes.

Keywords: slope exposure, surface hydrothermal processes, routine observations and quantitative analysis, seasonal frozen earth, the Great Xing'an Mountain

For citation: Yu Miao, Pavlova N. A., Dai Changlei. Hydrothermal conditions of southern and northern slope soils of northeastern Great Xing'an Mountain, China. *Nauki o Zemle i nedropol'zovanie = Earth sciences and subsoil use*. 2022;45(4): 408-423. (In Russ.). <https://doi.org/10.21285/2686-9993-2022-45-4-408-423>.

Введение

Дасинъаньлин (Большой Хинган) – горная система на северо-востоке Китая. Ее северная часть расположена на границе южной криолитозоны и области глубокого сезонного промерзания пород [1–3]. В данной переходной зоне высокотемпературные многолетнемерзлые и сезонномерзлые породы чрезвычайно чувствительны к изменениям окружающей среды [4–9], поэтому четкое представление о формировании и изменении теплового состояния грунтов под действием различных факторов на границе криолитозоны имеет важное значение для экологии, освоения территории и обслуживания инженерных объектов и сооружений. В региональном масштабе существование многолетней и сезонной мерзлоты контролируется климатом, географическим и высотным положением местности [10]. В локальном плане ландшафтные условия, включающие растительность, снежный покров, литологический состав грунтов, уклон поверхности и экспозицию склонов, играют важную роль в регулировании пространственного распределения гидротермических характеристик пород слоя сезонного протаивания и промерзания [10, 11]. В горных районах большое влияние на гидротермический режим почв и горных пород оказывает экспозиция склонов. Из-за разного количества поступающей на них лучистой энергии наблюдаются большие различия в пространственном распределении мерзлых пород [11, 12]. В связи с

этим в последние годы возрастает интерес к изучению влияния экспозиции склонов на формирование температурного поля пород и динамику сезонной и многолетней мерзлоты. Так, по данным М. Н. Железняк [13], в районе Алданского плоскогорья (юго-восток Сибирской платформы) в области прерывистого распространения многолетней мерзлоты на равных высотах на склонах южной экспозиции температура пород в целом на 1–3 °C выше, чем на склонах северной экспозиции. Дж. Лиу и др. [14] при геокриологических исследованиях внутренних районов Тибетского нагорья выявили, что термическая стабильность грунтов и содержание в них льда выше, а площадное распределение многолетней мерзлоты более сложное на северных склонах, чем на южных. Ж. Луо и др. [15] при изучении теплового режима пород гор Куньлунь в период 2014–2016 гг. установили, что средняя годовая температура поверхности земли на южном и северном склонах составляла -1,5 и -2,8 °C соответственно, а грунты в кровле вечной мерзлоты теплее на 0,6 °C на южном склоне, чем на северном. Ц. Ву. и др. [16] и Ю. Чоу и др. [17] проанализировали результаты мониторинговых геотермических наблюдений на участках Цинхай-Тибетской железной дороги в пределах зоны развития высокотемпературных мерзлых грунтов и оценили влияние солярной ориентации откосов на устойчивость насыпи. Исследователи отметили, что разница температур грунта между



северным и южным откосами достигает 4 °С, и пришли к выводу, что причиной неравномерного оседания дорожного полотна является асимметричное оседание кровли многолетней мерзлоты. М. Ишикава и др. [18] на основании долгосрочных мониторинговых наблюдений за температурой и влажностью грунтов в зоне прерывистого распространения мерзлоты в северо-восточной Монголии установили преимущественное распространение многолетнемерзлых пород на затененных склонах, здесь же отмечено максимальное содержание влаги в почве.

Обзор предыдущих исследований показал, что на разноориентированных склонах водно-тепловой режим почвогрунтов, формирующийся под действием природных факторов, оказывает важное влияние на пространственное распределение сезонной мерзлоты в горных районах и имеет далеко идущие последствия для устойчивости инженерных сооружений. Вместе с этим из-за ограниченного набора определяемых параметров окружающей среды и технических средств, а также сложной логистики в труднодоступные горные районы большинство результатов исследований процессов протаивания – промерзания пород имеет описательный характер и базируется на экспериментальных данных с разреженным или коротким рядом наблюдений, ограниченным полевым сезоном. Непрерывные круглогодичные исследования динамики влаги, тепла и солнечной энергии, а также особенностей взаимосвязи этих параметров в сезонно- и многолетнемерзлых грунтах в условиях горного рельефа остаются в литературе малоосвещенными. Для более полного понимания принципов формирования водно-теплого режима почвогрунтов, научно-обоснованных прогнозов изменения глубин деятельного слоя в области криолитозоны и регулирования процессов сезонного протаивания и промерзания пород требуются дополнительные количественные оценки вышеназванных параметров.

В настоящей работе представлены результаты комплексного изучения особенностей пространственно-временной изменчивости составляющих тепло-влагообмена почвы и атмосферы на полярно ориентированных

склонах гор Дасинъаньлин.

Материалы и методы исследования

Хребет Дасинъаньлин протягивается с юго-востока на северо-запад. Длина его более 1400 км, ширина – от 200 до ~400 км, высота над уровнем моря достигает 1100–1443 м (рис. 1). Особенностью климата этого региона является его резкая континентальность, которая проявляется в низких температурах воздуха зимой с абсолютным минимумом -52,3 °С и высоких температурах летом, достигающих 26–33 °С, с резкими перепадами в течение суток. Средняя годовая температура воздуха составляет -2,8 °С. Годовое количество атмосферных осадков – около 746 мм, из них около 50 % выпадает в июле и августе. На зимний период (ноябрь – март) приходится примерно 8 % от годовой суммы осадков. За это время формируется снежный покров максимальной толщины от 6,2 до 35,3 см [19].

В качестве ключевых участков исследований нами были выбраны гидрометеорологические станции Сунлин и Логухэ с близкими геолого-геоморфологическими условиями (см. рис. 1). Ключевые участки Сунлин (далее – южный склон) и Логухэ (далее – северный склон) расположены на высотах 600 и 655 м с уклонами поверхности 6,8 и 7,1° соответственно. Растительный покров на южном склоне по сравнению с северным скудный, соответственно изменяется и содержание органического вещества в почве на глубине 0,05 м: 31,21 г/кг на станции Сунлин и 16,34 г/кг на станции Логухэ. Геологическое строение участков изучено до глубины 5 м. При бурении скважин были вскрыты однотипные литологические разрезы (рис. 2). Сверху залегают гравийно-щебнистые отложения с песчаным и суглинистым заполнителем. Их мощность составляет 1,5 м на северном склоне и 1,8 м на южном. Вниз по разрезу дисперсность пород возрастает, и с глубины 3–3,4 м залегают песчано-глинистые отложения. Слой сезонного промерзания пород формируется в октябре и полностью оттаивает на северном склоне в конце июня, а на южном – в конце мая. Его максимальная мощность составляет 2,9–3,5 м на станции Логухэ и 2,2–3 см на станции Сунлин.

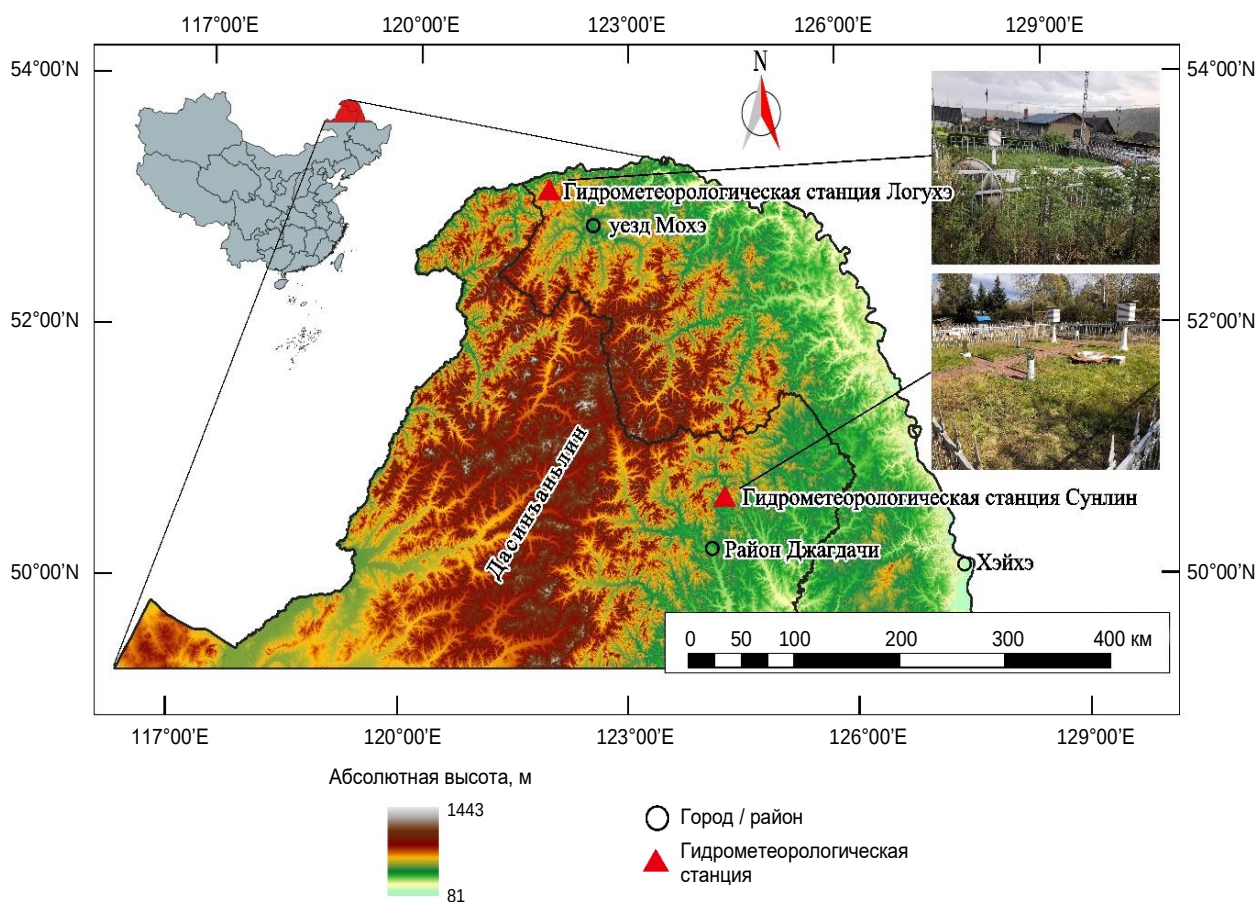


Рис. 1. Расположение гидрометеорологических станций Сунлин (южный склон) и Логухэ (северный склон) в регионе Дасинъаньлин
Fig. 1. Location of hydrometeorological stations of Songling (southern slope) and Luoguhe (northern slope) in Great Xing'an Mountains

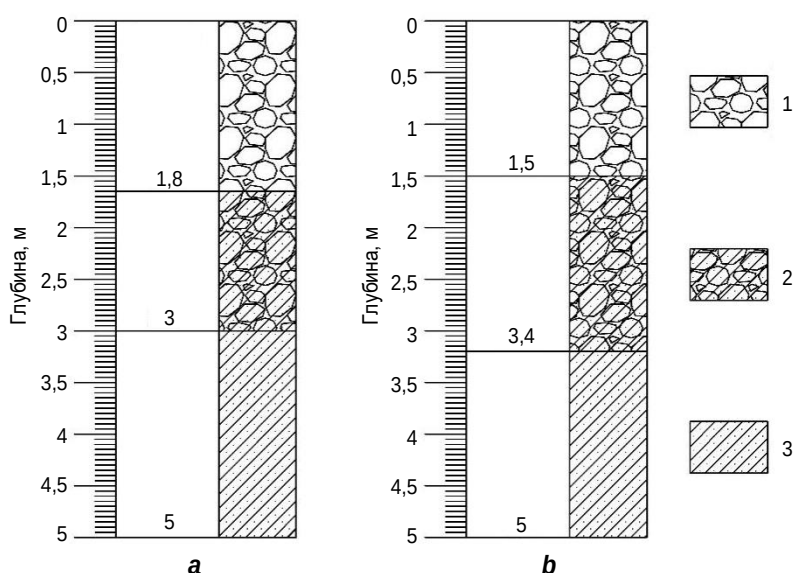


Рис. 2. Геологическое строение ключевых участков на южном (а) и северном (б) склонах гор Дасинъаньлин:
1 – гравийно-щебнистые почвы; 2 – песчаная глина с галькой; 3 – песчаная глина
Fig. 2. Geological structure of the key sites on the southern (a) and northern (b) slopes of the Great Xing'an Mountains:
1 – gravel-pebble soils; 2 – sandy clay with pebbles; 3 – sandy clay



На изучаемых участках метеорологические параметры (температура воздуха и скорость ветра) замерялись и записывались в автоматическом режиме специальными датчиками, установленными на высоте 1,8 м от поверхности земли. Общее солнечное излучение фиксировалось с помощью измерителя SMP11 со спектральным диапазоном длин волн 310–2800 нм и максимальной интенсивностью излучения 2000 Вт/м². Тепловые потоки в почве замерялись соответствующим датчиком, установленным на глубине 0,05 м от поверхности земли. Перечисленные выше параметры регистрировались каждые 30 минут. По полученным данным были рассчитаны средние суточные значения солнечной радиации, альбедо поверхности, температуры воздуха, скорости ветра и теплового потока в почве. При расчете средних месячных величин солнечной радиации и альбедо поверхности использовали средние суточные значения для каждого месяца с октября 2018 г. по май 2020 г., многолетние средние значения вычисляли на основе ежедневных средних значений с 11 октября 2018 г. по 31 мая 2020 г.

Для изучения изменения температуры и влажности почвогрунтов на каждом ключевом участке было пробурено по три скважины, в которых установлены логгеры с соответствующими датчиками автоматической регистрации данных. В представленном исследовании использованы данные о температуре почвы на глубине 0,05 м от поверхности земли (далее «слой почвы мощностью 0,05 м» и «подстилающая поверхность» используются как синонимы). Содержание влаги в грунтах измерялось на глубинах 0,05, 0,25, 0,75 и 1,5 м. Записи показаний температуры и влажности почвогрунтов велись с периодичностью в 3 часа. По ним были рассчитаны средние суточные значения. В расчетах средних температур грунтов учитывали данные, получаемые по трем скважинам. Кроме того, для количественной оценки различий температур грунтов на северном и южном склонах результаты измерений на каждом участке мониторинга были подвергнуты статистическому анализу, для обоих участков также были рассчитаны величины погрешности измерений. Наблюдения, начатые 11 октября 2018 г., продолжа-

лись до 31 мая 2020 г. и охватили два полных цикла промерзания – протаивания пород.

Высота снежного покрова измерялась вручную с помощью снегомерной ленты. При наличии снежного покрова высотой $\geq 0,5$ см он считался существующим на участке, а этот день регистрировался как один снежный день. По результатам мониторинга снежный покров устойчиво сохранялся с 21 октября 2018 г. по 19 апреля 2019 г. и с 23 октября 2019 г. по 17 апреля 2020 г. Максимальной толщины он достигал в январе: 28–30,1 см на северном склоне и 19,5–20,2 см на южном участке.

Результаты исследования

Температура воздуха и скорость ветра. По данным наблюдений 1980–2020 гг., средняя годовая температура воздуха в районе станции Сунлин равна $-0,5^{\circ}\text{C}$, а на станции Логухэ $-1,7^{\circ}\text{C}$. В 2018–2020 гг. на исследуемых участках в бесснежный период года среднесуточные максимальные температуры воздуха на южном и северном склонах составили $23,9$ и $22,5^{\circ}\text{C}$ соответственно. В период устойчивого снежного покрова среднесуточные минимальные температуры воздуха на южном и северном склонах достигали $-28,4$ и $-33,1^{\circ}\text{C}$ соответственно. На обоих участках диапазон изменения среднесуточных температур воздуха был шире при наличии снежного покрова, чем без него.

Скорость ветра оказывает влияние на гидротермическое состояние поверхности земли в теплое время года вследствие перемешивания верхних теплых и нижних холодных слоев воздуха. Ветровой режим на ключевых участках примерно одинаков (рис. 3). Наиболее ветреные месяцы – апрель и май. В бесснежный период средняя суточная скорость ветра незначительно отличается и составляет $2,3$ м/с на южном склоне и 2 м/с на северном.

Температурный режим и динамика промерзания – протаивания почвы. Сезонные, суточные и внутрисуточные колебания температуры в верхней части слоя сезонного протаивания оказывают важное влияние на текстуру и свойства почвы. По данным наблюдений 2018–2020 гг., диапазон внутрисуточных колебаний температуры почвы на глубине 0,05 м на южном склоне значительно шире,

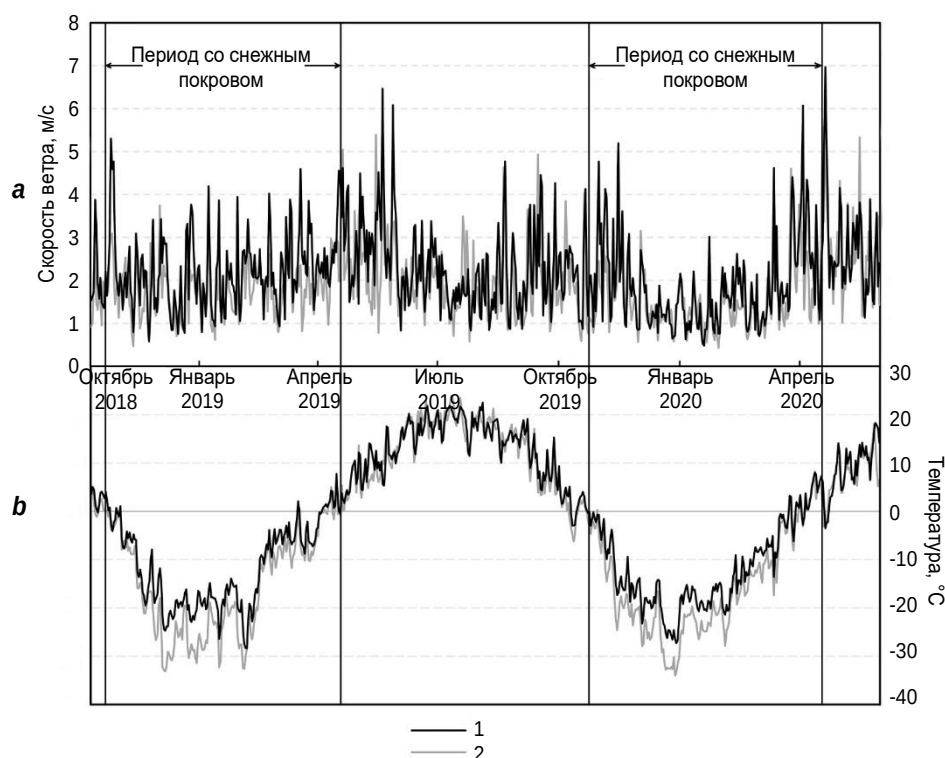


Рис. 3. Средние суточные скорость ветра (а) и температура воздуха (б) на ключевых участках:

1 – южный склон; 2 – северный склон

Fig. 3. Average daily wind speed (a) and air temperature (b) at key sites:

1 – southern slope; 2 – northern slope

чем на северном, и составляет 6,3 и 3,9 °С соответственно. Разница в экстремумах средней суточной температуры подстилающей поверхности на изучаемых участках составляет в теплый период года 1,5–8,8 °С, а в холодный 2,6–4 °С. При сходных метеорологических параметрах летом почва на южном склоне прогревается лучше, чем на северном (рис. 4). Это явление объясняется следующим: во-первых, южный склон, имея относительно большее количество световых часов, нагревается за счет солнечной радиации интенсивнее северного; во-вторых, на северном склоне относительно высокая удельная теплоемкость более влажной почвы сдерживает прогревание грунта и сокращает амплитуду изменения температуры.

Зимой при малом поступлении лучистой энергии, а также благодаря теплоизоляционным свойствам снежного слоя полярно ориентированные склоны охлаждаются практически одинаково.

Для изучения динамики промерзания – протаивания почвы в качестве пограничной величины использована температура 0 °С.

Суточный цикл промерзания – оттаивания считается состоявшимся, если в течение суток фиксируются переходы отрицательной температуры к положительной и наоборот. За период наблюдений на южном участке зафиксировано 100 ежедневных циклов промерзания – оттаивания почвы, в то время как на северном за это же время только 56. Причина разницы в числе циклов кроется в пониженной влажности почвы и скудном растительном покрове на южном склоне по сравнению с северным. Чем суше почва, тем меньше тратится тепла на фазовые переходы, следовательно, тем быстрее грунт нагревается днем и охлаждается ночью.

Момент перехода средних суточных положительных значений температуры к отрицательным принят как начальная дата сезонного промерзания почвы. Время, когда среднесуточная температура грунтов становится выше 0 °С, считается начальной датой их оттаивания. Согласно полученным результатам, в период наблюдений формирование сезонно-мерзлого слоя на южном склоне запаздывает относительно северного на 15–20 суток, а раз-



рушение начинается раньше на период от 2 дней до 10 суток (табл. 1). Из-за разной продолжительности периода, когда грунты нахо-

дятся в мерзлом состоянии, их среднегодовая температура на южном склоне на 3,1 °C выше, чем на северном.

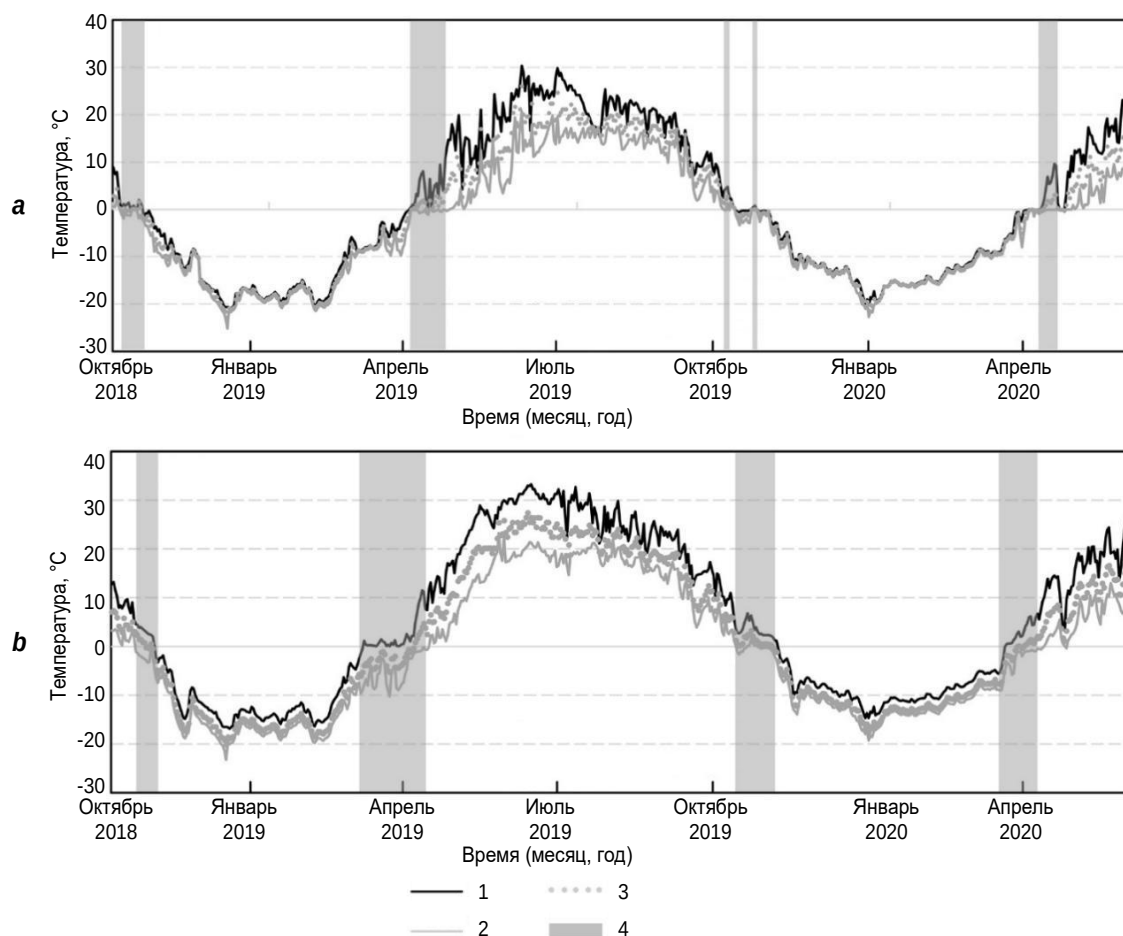


Рис. 4. Пределы изменения и средние температуры почвы на глубине 0,05 м на северном (а) и южном (б) склонах гор Дасинъаньлин:

1 – максимальная температура; 2 – минимальная температура; 3 – средняя температура; 4 – суточный цикл промерзания – оттаивания

Fig. 4. Variation limits and average soil temperatures at 0.05 m depth

on the northern (a) and southern (b) slopes of the Great Xing'an Mountains:

1 – maximum temperature; 2 – minimum temperature; 3 – average temperature; 4 – daily freeze-thaw cycle

Таблица 1. Изменение температуры грунта на глубине 0,05 м на исследуемых участках

Table 1. Soil temperature variation at 0.05 m depth on the sites under investigation

Параметр	11 октября 2018 г. – 31 мая 2019 г.		1 июня 2019 г. – 31 мая 2020 г.	
	Южный склон	Северный склон	Южный склон	Северный склон
Дата начала промерзания	31 октября	16 октября	3 ноября	12 октября
Дата начала протаивания	7 апреля	5 апреля	29 марта	9 апреля
Длительность периода промерзания, сут.	159	172	148	168
Средняя годовая температура, °C	–	–	4,5	1,4
Максимальная среднесуточная температура грунта, °C (дата)	25,8 (29 мая)	17 (15 мая)	27,5 (12 июня)	26 (8 июня)
Минимальная среднесуточная температура грунта, °C (дата)	-20,2 (17 декабря)	-22,8 (17 декабря)	-17,4 (29 декабря)	-21,4 (29 декабря)

Примечание. Прочерк – данные отсутствуют.



Изменение влажности почвы. Содержание влаги в мерзлой почве на разных глубинах в период устойчивых отрицательных температур воздуха варьируется незначительно. При наступлении положительных температур воздуха влажность почвы на глубине 0,05 м заметно изменяется из-за инфильтрации талой воды и летних атмосферных осадков, а также процессов испарения. На глубинах 0,25 и 0,75 м динамика содержания влаги в почве в течение года близка на обоих участках, отмечается лишь небольшое отставание ее изменения на глубине 0,75 м по сравнению с вышележающим слоем (рис. 5). В основании разреза на глубине 1,5 м влажность почвы колеблется незначительно.

В период наблюдений максимальное влагонасыщение почвы по всему разрезу отмечалось в середине мая, середине июля и начале

сентября, а осушение происходило в июне – начале июля. В целом на всех глубинах влажность почвы выше на северном склоне, чем на южном (табл. 2). С началом осенних заморозков (с октября) и до конца марта при промерзании грунтов кривая содержания в них незамерзшей воды постепенно выполаживается. В течение зимы слабовыраженный рост влажности на глубине 0,05 м на фоне ее небольшого понижения в остальной части изучаемого разреза свидетельствует о миграционных процессах в изучаемой толще (перенос влаги из нижележащих талых пород в наиболее охлажденные приповерхностные слои).

Распределение солнечной радиации. Поток лучистой энергии подвержен отчетливым сезонным изменениям (рис. 6, табл. 3). По имеющимся данным, коротковолновая солнечная радиация на южном и северном склонах

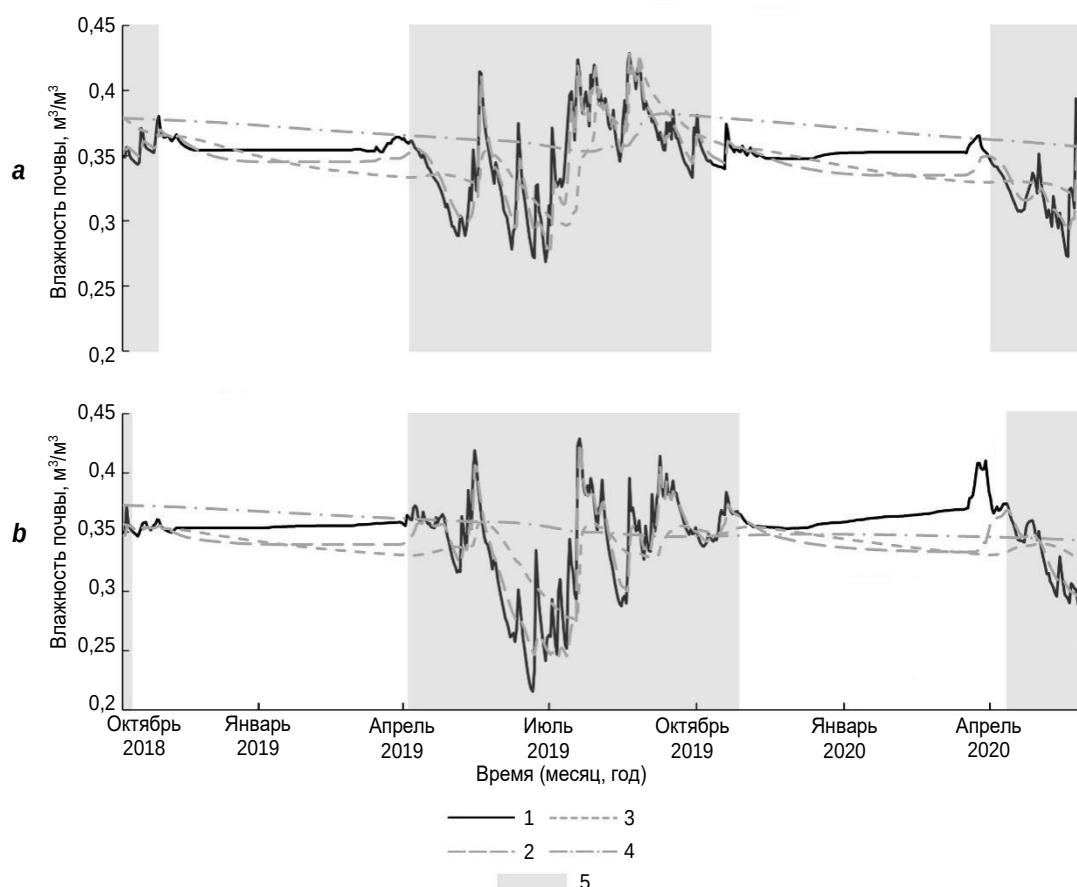


Рис. 5. Изменение средней суточной влажности почвы на разной глубине на южном (а) и северном (б) склонах северо-восточной части гор Дасинъянлин:
1 – 0,05 м; 2 – 0,25 м; 3 – 0,75 м; 4 – 1,5 м; 5 – период с положительными температурами воздуха
Fig. 5. Variation of average daily soil moisture at different depths on the southern (a) and northern (b) slopes of the north-east of the Great Xing'an Mountains:
1 – 0.05 m; 2 – 0.25 m; 3 – 0.75 m; 4 – 1.5 m; 5 – period with positive air temperatures



Таблица 2. Средняя суточная влажность почвогрунтов на разной глубине на южном и северном склонах северо-восточной части гор Дасинъаньлин, $\text{м}^3/\text{м}^3$
Table 2. Average daily moisture content of soils at different depths on the southern and northern slopes in the north-east of the Great Xing'an Mountains, m^3/m^3

Глубина, м	Максимальная		Минимальная		Средняя	
	Южный склон	Северный склон	Южный склон	Северный склон	Южный склон	Северный склон
0,05	0,43	0,48	0,24	0,27	0,35	0,4
0,25	0,43	0,48	0,28	0,29	0,34	0,39
0,75	0,43	0,44	0,3	0,33	0,35	0,39
1	0,38	0,42	0,35	0,39	0,37	0,4

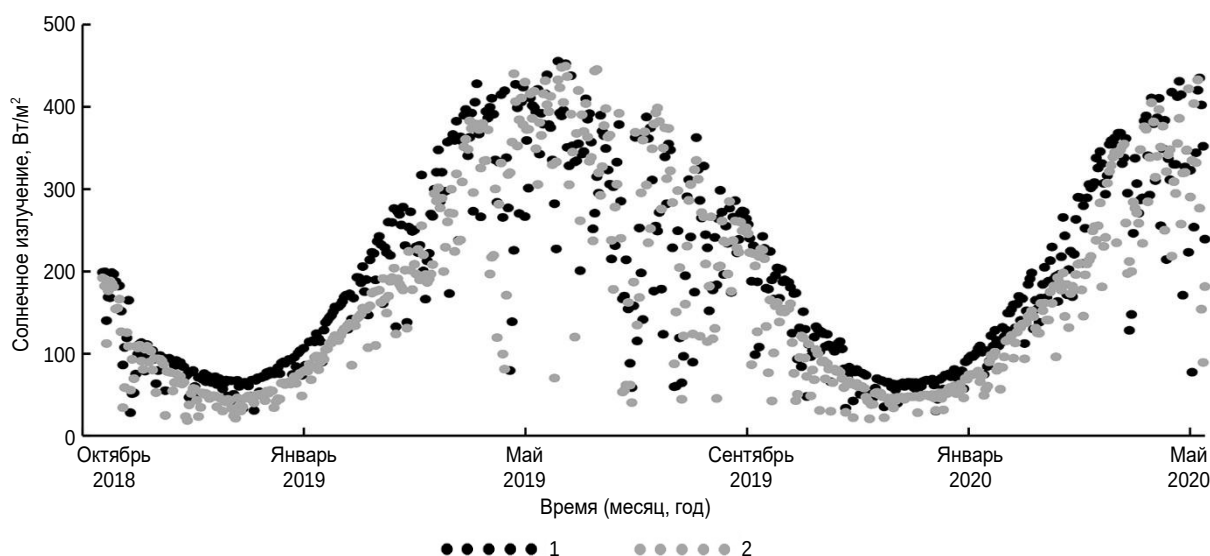


Рис. 6. Динамика солнечной радиации на северном и южном склонах северо-восточной части гор Дасинъаньлин:

1 – северный склон; 2 – южный склон

Fig. 6. Solar radiation dynamics on the northern and southern slopes in the north-east of the Great Xing'an Mountains:

1 – northern slope; 2 – southern slope

Таблица 3. Средние месячные значения коротковолновой радиации, $\text{Вт}/\text{м}^2$, на южном и северном склонах северо-восточной части гор Дасинъаньлин, 2018–2020 гг.
Table 3. Average monthly values of shortwave radiation, W/m^2 , on the southern and northern slopes in the north-east of the Great Xing'an Mountains, 2018–2020

Месяц	Ориентация склона	
	Южный	Северный
Январь	82	59
Февраль	146	114
Март	224	173
Апрель	304	268
Май	340	317
Июнь	367	364
Июль	263	263
Август	242	272
Сентябрь	235	211
Октябрь	162	127
Ноябрь	91	65
Декабрь	59	44
Среднее значение	210	190



достигала максимума 15 и 19 июня 2019 г. (424 и 447 Вт/м² соответственно), а минимальная была 18 ноября и 1 декабря 2019 г. (34 и 21 Вт/м² соответственно). С октября по январь радиационный поток снижался с 200 до 100 Вт/м². С февраля по мере продвижения солнца на север и схода снежного покрова приток солнечной радиации на обоих участках постепенно увеличивался и достиг пиковых значений в середине мая – июне. В летние месяцы с началом вегетационного сезона в процессе наращивания растительного покрова, а также при увеличении облачности проникновение солнечной радиации к поверхности земли периодически затруднялось, что отразилось в скачкообразных изменениях ее величин. В конце октября смещение солнца на юг и появление снежного покрова привели к дальнейшему понижению потока лучистой энергии, поступающего на поверхность земли.

В целом на южном склоне в течение всего года, за исключением июля, условия для инсоляции были лучше, чем на северном, из-за большего угла падения солнечных лучей. В июле разница в приходе радиации между ключевыми участками составила менее 1 %. В это время при максимальной высоте стояния солнца его энергетические ресурсы распределялись равномерно по поверхности земли. В декабре – феврале из-за уменьшения угла наклона солнечных лучей северный склон слабее подвержен инсоляции, поэтому количество получаемой им энергии излучения меньше, чем у южного склона. Максимальный же контраст средней месячной величины коротковолновой радиации на изучаемых участках отмечен в переходные периоды года – время становления и разрушения снежного покрова. Разница средней годовой плотности потока солнечной радиации, поступающей на полярно ориентированные склоны, составила 20 Вт/м².

Обсуждение полученных результатов

Влияние экспозиции склонов на свойства приповерхностной зоны грунтов. В процессе статистической обработки результатов годового цикла (с 1 июня 2019 г. по 30 мая 2020 г.) наблюдений, полученных по трем скважинам

на каждом участке, установлено, что температурные условия подстилающей поверхности на полярно ориентированных склонах не одинаковы. На южном склоне во всех точках наблюдений разброс значений температуры грунта на глубине 0,05 м относительно невелик, а стандартная ошибка средней годовой температуры в целом меньше, чем на северном склоне (рис. 7). Максимальная и минимальная средние суточные температуры, а также средняя годовая температура грунта в каждой точке наблюдений на южном склоне близки и имеют стандартные ошибки 0,54, 0,56 и 0,32 соответственно, для северного склона этот статистический параметр оказался выше и составил 0,69, 0,7 и 0,38 соответственно.

Контраст температурных условий почвы ассоциирован с особенностями растительности. Так, на южном склоне разреженный, но однообразный по площади растительный покров приводит к незначительной вариации свойств подстилающей поверхности (влажности, шероховатости и т. д.) и, следовательно, к относительно равномерному распределению температур грунта в верхней части разреза. На северном склоне пространственная неоднородность растительного покрова определяет более пеструю картину теплового поля в приповерхностных слоях почвы.

Влияние эффектов южного и северного склонов на энергетический баланс у поверхности земли. Известно, что экспозиция склонов в горных районах играет существенную роль в нагревании поверхности за счет поступающей солнечной радиации [20]. На изучаемых участках между поступающей лучистой энергией и температурой почвы на глубине 0,05 м существует заметная положительная корреляция (рис. 8). При этом выявленная разница радиации, приходящей на разноориентированные склоны, несущественна, в связи с чем лучистая энергия не может рассматриваться в качестве единственного фактора, влияющего на термический режим грунтов.

Зимой при наличии снежного покрова коротковолновая солнечная радиация обычно не превышает 200 Вт/м². Основная ее часть отражается от снега обратно в атмосферу

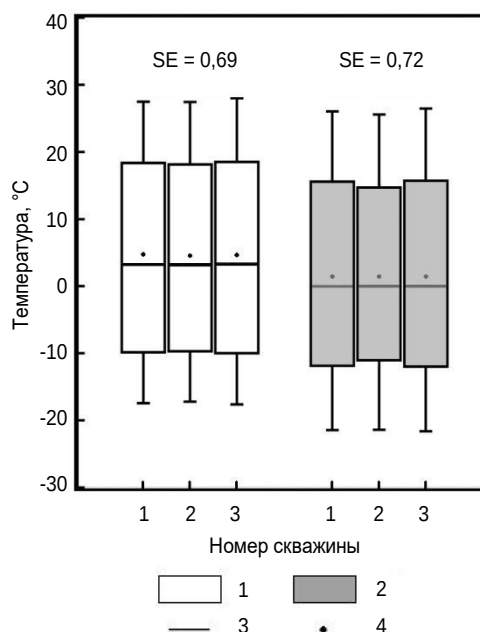


Рис. 7. Распределение средней годовой температуры грунта на глубине 0,05 м на изучаемых участках в период 2019–2020 гг.:

1 – южный склон; 2 – северный склон; 3 – медиана; 4 – среднегодовые геотермы

Fig. 7. Distribution of the average annual soil temperature at 0.05 m depth on the sites under investigation for the period from 2019 to 2020:

1 – southern slope; 2 – northern slope; 3 – median; 4 – average annual geotherms

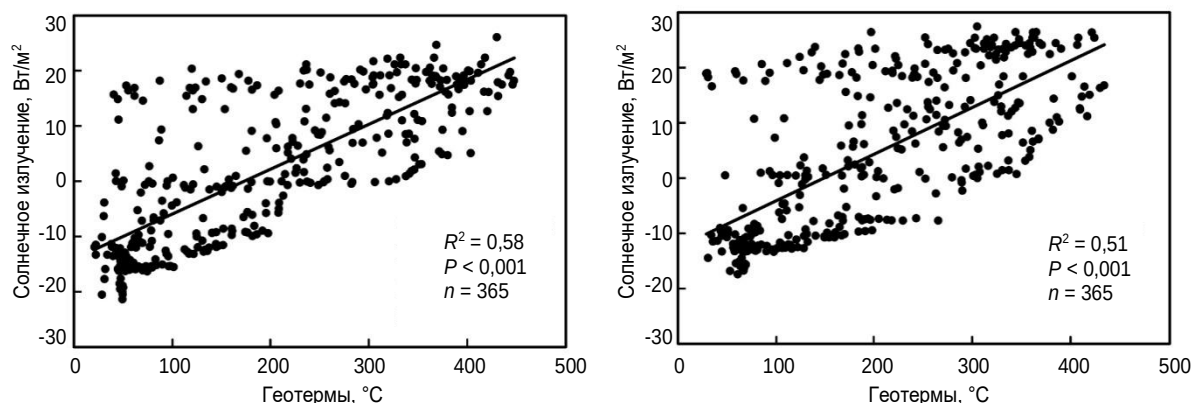


Рис. 8. Зависимость температура почвы (глубина 0,05 м) от солнечной коротковолновой радиации на северном (а) и южном (б) склонах северо-восточной части гор Дасинъаньлин в период 2019–2020 гг.

Fig. 8. Dependence of soil temperature (0.05 m depth) on shortwave solar radiation on the northern (a) and southern (b) slopes in the north-east of the Great Xing'an Mountains for the period from 2019 to 2020

в виде длинноволновой радиации. Остальная – меньшая – часть через снежную толщу проникает неглубоко от поверхности земли. В результате в зимний период средние суточные значения температуры почвы на глубине 0,05 м оказались ненамного выше средних суточных температур воздуха. Разница между ними составила на южном склоне 1,8 °С, а на северном 4,3 °С.

Различия в свойствах подстилающего слоя оказывает важное влияние на распределение теплового потока в почве. Поверхност-

ный поток возникает благодаря лучистой энергии солнца, зависит от ее интенсивности и продолжительности суточного поступления, а также от особенностей турбулентного влагообмена между ландшафтной оболочкой земли и атмосферой [8]. По имеющимся данным, на изучаемых участках весной и в первой половине лета плотность теплового потока на глубине 0,05 м имела отрицательные значения, то есть поток тепла был направлен из почвы в атмосферу (рис. 9). При этом на южном склоне из-за низкой влажности почвы

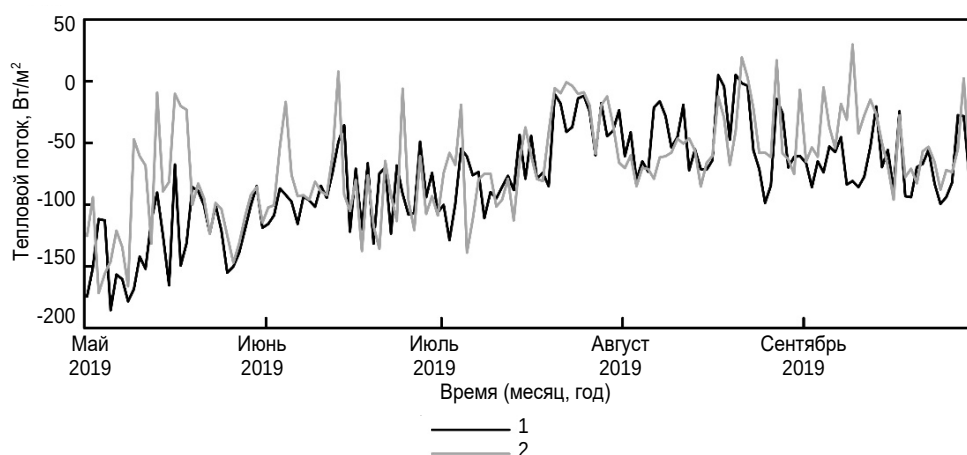


Рис. 9. Динамика тепловых потоков почвы на северном и южном склонах северо-восточной части гор Дасинъаньлин в 2019 г.:

1 – северный склон; 2 – южный склон

Fig. 9. Soil heat flux dynamics on the northern and southern slopes in the north-east the Great Xing'an Mountains:

1 – northern slope; 2 – southern slope

расход тепла превосходил его потерю на северном участке. В конце июля – августе величина теплового потока приблизилась к нулевым значениям, а скачкообразные изменения солнечной радиации нивелировали разницу среднесуточного потока на склонах разной экспозиции. В сентябре устойчивое сезонное понижение лучистой энергии отразилось в постепенной потере тепла почвой.

Согласно данным мониторинга, колебание тепловых потоков на глубине 0,05 м в течение суток, вызываемые нагреванием почвы днем и охлаждением ночью, на южном склоне больше, чем на северном. Различие в контрасте дневных теплооборотов объясняется следующими факторами: пониженная влажность и грубый механический состав почвы на южном склоне интенсифицирует теплообменные процессы; чем выше скорость ветра, тем сильнее эффект турбулентного теплообмена между поверхностью и атмосферой, поэтому суточные изменения плотности теплового потока более выражены на южном склоне, чем на северном.

Влияние экспозиции склонов на изменение температуры и влажности почвы в приповерхностной зоне. Поступление солнечной радиации в теплый период года на поверхность склона южной ориентации ненамного больше, чем на склон, обращенный к северу. При этом почва на южном склоне летом, особенно в первые его месяцы, нагревается

замечто сильнее, чем на северном. Причины этого различия могут быть связаны с особенностями растительного покрова и составом почвы. Во-первых, растительность является одним из факторов, определяющих теплообмен между атмосферой и литосферой [11]. Измеренное солнечное излучение в данном исследовании – это энергия над почвенным покровом. Более развитая кустарниковая растительность на северном склоне поглощает часть этого излучения. Следовательно, фактически солнечная радиация, достигающая поверхности почвы на северном склоне, будет меньше измеренного значения. Во-вторых, почва на южном склоне обеднена органическим веществом по сравнению с северным вследствие слабого роста растительности, что вместе с более высокой скоростью ветра усиливает процесс эрозии почвы. Кроме того, на северном склоне значительное количество органического вещества в почве понижает ее теплопроводность. В результате на южном склоне, где содержание крупных частиц и теплопроводность почвы выше, прогревание склона и теплообмен с атмосферой происходят интенсивнее.

Выравнивание температуры почвы на участках исследований в середине лета, возможно, обусловлено активизацией на северном склоне биохимических процессов (образованием и разложением органических веществ), которые сопровождаются выделением



тепла. Этот вопрос требует дальнейшего изучения.

Совокупное влияние всех вышеперечисленных факторов (более высокие температура воздуха и скорость ветра, относительно редкая и низкорослая растительность, повышенное содержание крупных частиц) определяет низкую водоудерживающую способность почвы южного склона и более выраженные изменения содержания в ней влаги в течение года и с увеличением глубины по сравнению с северным склоном.

Заключение

Анализ результатов режимных наблюдений за температурой воздуха, скоростью ветра, величиной солнечной радиации, формированием и таянием снежного покрова, температурой и влажностью верхнего слоя почвы, тепловым потоком позволил уточнить влияние экспозиции склонов на динамику гидротермических параметров подстилающей поверхности в северо-восточной части гор Дасиньянлин.

При изучении факторов, определяющих ход влаго- и теплообмена между атмосферой и почвой на северном и южном склонах горной системы Дасиньянлин, выявлена пространственная изменчивость в поступлении лучистой энергии, растительности, температуре и влажности почвы, длительности и количестве циклов ее промерзания – оттаивания. Комплекс перечисленных факторов оказывает влияние на текстуру почвы. Состав и свойства почвы, в свою очередь, влияют на ее термическое состояние и влажность, а также рост растительности. Такая взаимосвязь элементов природной среды приводит к постепенному увеличению контраста в текстуре почвы между северными и южными склонами.

Интеграционное влияние солнечной радиации и свойств почвы приводит к превышению почти в два раза количества суточных циклов промерзания – оттаивания грунтов на глубине

0,05 м на южном склоне относительно северного склона.

Разность температуры и текстуры почвенного покрова между северным и южным склонами существенно сказывается на распределении влаги в сезоннопромерзающем слое пород. На южном склоне влажность грунтов в исследуемом интервале глубин (0,05–1,5 м) на 4–5 % меньше, чем на северном, из-за относительно высокой температуры почвы, большей скорости ветра, относительно неровной поверхности почвы и высокого испарения почвенной влаги.

Одновременно с тем, что неравенство в поступлении солнечной радиации на разные склоны отражается в специфике тепло- и влагообменных процессов в почве, температура и влажность почвы, скорость ветра, растительность также контролируют обмен энергией между атмосферой и поверхностью земли. Итогом этой взаимообусловленности является превышение величины среднегодовой солнечной коротковолновой радиации и выраженная суточная изменчивость тепловых потоков на южных склонах по сравнению с северными.

Таким образом, ориентация склонов является одним из существенных экологических факторов, влияющих на поступление солнечной энергии, температуру и влажность грунтов северо-восточной части гор Дасиньянлин, а также играет решающую роль в пространственном распределении и эволюции сезонной мерзлоты в регионе и, соответственно, влияет на устойчивость и безопасность инженерных сооружений. Экспериментально полученные количественные характеристики составляющих тепло- и влагообмена могут быть использованы при задании параметров и верхних граничных условий в соответствующих моделях формирования и динамики слоя промерзания – протаивания горных пород для повышения точности мерзлотных и инженерно-геологических прогнозов.

Список источников

1. Ran Y., Li X., Cheng G., Zhang T., Wu Q., Jin H., et al. Distribution of permafrost in China: an overview of existing permafrost maps // *Permafrost and Periglacial Processes*. 2012. Vol. 23. Iss. 4. P. 322–333. <https://doi.org/>

10.1002/ppp.1756.

2. Mao Y., Li G., Ma W., Mu Y., Wang F., Miao J., et al. Field observation of permafrost degradation under Mo'he airport, Northeastern China from 2007 to 2016 // *Cold*



Regions Science and Technology. 2019. Vol. 161. P. 43–50. <https://doi.org/10.1016/j.coldregions.2019.03.004>.

3. Li X., Jin H., Sun L., Wang H., He R., Huang Y., et al. Climate warming over 1961–2019 and impacts on permafrost zonation in Northeast China // *Journal of Forestry Research*. 2022. Vol. 33. Iss. 3. P. 767–788. <https://doi.org/10.1007/s11676-021-01403-y>.

4. Конищев В. Н. Реакция вечной мерзлоты на потепление климата // *Вестник Московского университета. Серия. 5. География*. 2009. № 4. С. 10–20.

5. Оберман Н. Г., Лыгин А. М. Прогнозирование деградации многолетнемерзлых пород на примере европейского северо-востока страны // *Разведка и охрана недр*. 2009. № 7. С. 15–20.

6. Romanovsky V. E., Drozdov D. S., Oberman N. G., Malkova G. V., Kholodov A. L., Marchenko S. S., et al. Thermal state of permafrost in Russia // *Permafrost and Periglacial Processes*. 2010. Vol. 33. Iss. 3. P. 136–155. <https://doi.org/10.1002/ppp.683>.

7. Малкова Г. В., Павлов А. В., Скачков Ю. Б. Оценка устойчивости мерзлых толщ при современных изменениях климата // *Криосфера земли*. 2011. Т. 15. № 4. С. 33–36.

8. Ge S., McKenzie J., Voss C., Wu Q. Exchange of groundwater and surface-water mediated by permafrost response to seasonal and longterm air temperature variation // *Geophysical Research Letters*. 2011. Vol. 38. Iss. 14. P. L14402. <https://doi.org/10.1029/2011gl047911>.

9. Нямдорж С. Мягмаржав М. Батсайхан А. Тамир Ц. Некоторые результаты исследований трещин и полостей, образованных вследствие деградации и исчезновения криолитозоны территории г. Налайха в Монголии // *Вестник гражданских инженеров*. 2019. № 3. С. 52–62. <https://doi.org/10.23968/1999-5571-2019-16-3-52-62>.

10. Woo M. *Permafrost hydrology*. Berlin: Springer Science & Business Media, 2012. 564 p.

11. Павлов А. В. *Теплофизика ландшафтов*. Новосибирск: Наука, 1979. 285 с.

12. Шепелёв В. В. *Надмерзлотные воды криолитозоны*. Новосибирск: Гео, 2011. 169 с.

13. Железняк М. Н. Геотемпературное поле и крио-

литозона юго-востока Сибирской платформы. Новосибирск: Наука, 2005. 227 с.

14. Liu G., Zou D., Yang B., Du E., Zhou H., Xiao Y., et al. Preliminary results of permafrost investigation on northern and southern slopes of Mt. Geladandong, interior Qinghai-Tibet Plateau // *Journal of Glaciology and Geocryology*. 2022. Vol. 44. Iss. 1. P. 83–95. <https://doi.org/10.7522/j.issn.1000-0240.2022.0021>.

15. Luo J., Lin Z., Yin G., Niu F., Liu M., Gao Z., et al. The ground thermal regime and permafrost warming at tow upland, sloping, and undisturbed sites, Kunlun Mountain, Qinghai-Tibet Plateau // *Cold Regions Science and Technology*. 2019. Vol. 167. P. 102862. <https://doi.org/10.1016/j.coldregions.2019.102862>.

16. Wu Q., Liu Y., Hu Z. The thermal effect differential so-lar exposure on embankments along the Qinghai-Tibet Railway // *Cold Regions Science and Technology*. 2011. Vol. 66. Iss. 1. P. 30–38. <https://doi.org/10.1016/j.coldregions.2011.01.001>.

17. Chou Y., Sheng Y., Li Y., Wei Z., Zhu Y., Li J. Sunny-shady slope effect on the thermal and deformation stability of the highway embankment in warm permafrost regions // *Cold Regions Science and Technology*. 2010. Vol. 63. Iss. 1-2. P. 78–86. <https://doi.org/10.1016/j.coldregions.2010.05.001>.

18. Ishikawa M., Sharkhuu N., Zhang Y., Kadota T., Ohata T. Ground thermal and moisture conditions at the southern boundary of discontinuous permafrost, Mongolia // *Permafrost and Periglacial Processes*. 2005. Vol. 16. Iss. 2. P. 209–216. <https://doi.org/10.1002/ppp.483>.

19. Baoleerqimuge, Shu C., Ma X., Liu Z., Li C., Zhang Z. Analysis on the spatial-temporal characteristics of accumulated snow in the northern forestry region of greater khingan range from 1975 to 2016 // *Journal of Inner Mongolia Agricultural University (Natural Science Edition)*. 2021. Vol. 42. Iss. 2. P. 27–35. <https://doi.org/10.16853/j.cnki.1009-3575.2021.02.006>.

20. Lu A., Pang D., Ge Y., He Y., Pang H., Yuan L. Effect of landform on seasonal temperature structures across China in the past 52 years // *Journal of Mountain Science*. 2006. Vol. 3. Iss. 2. P. 158–167. <https://doi.org/10.1007/s11629-006-0158-x>.

References

1. Ran Y., Li X., Cheng G., Zhang T., Wu Q., Jin H., et al. Distribution of permafrost in China: an overview of existing permafrost maps. *Permafrost and Periglacial Processes*. 2012;23(4):322–333. <https://doi.org/10.1002/ppp.1756>.

2. Mao Y., Li G., Ma W., Mu Y., Wang F., Miao J., et al. Field observation of permafrost degradation under Mo'he airport, Northeastern China from 2007 to 2016. *Cold Regions Science and Technology*. 2019;161:43–50. <https://doi.org/10.1016/j.coldregions.2019.03.004>.

3. Li X., Jin H., Sun L., Wang H., He R., Huang Y., et al. Climate warming over 1961–2019 and impacts on permafrost zonation in Northeast China. *Journal of Forestry Research*. 2022;33(3):767–788. <https://doi.org/10.1007/s11676-021-01403-y>.

4. Konishchev V. N. Response of permafrost to the climate warming. *Vestnik Moskovskogo universiteta. Seriya 5,*

Geografiya = Moscow University Bulletin. Series 5, Geography. 2009;4:10–20. (In Russ.).

5. Oberman N. G., Lygin A. M. Prognosis of the degradation of permafrost in an example of european north-east of Russia. *Razvedka i okhrana nedr = Prospect and protection of mineral resources*. 2009;7:15–20. (In Russ.).

6. Romanovsky V. E., Drozdov D. S., Oberman N. G., Malkova G. V., Kholodov A. L., Marchenko S. S., et al. Thermal state of permafrost in Russia. *Permafrost and Periglacial Processes*. 2010;33(3):136–155. <https://doi.org/10.1002/ppp.683>.

7. Malkova G. V., Pavlov A. V., Skachkov Yu. B. Estimation of frozen strata stability under modern climate change. *Kriosfera zemli*. 2011;15(4):33–36. (In Russ.).

8. Ge S., McKenzie J., Voss C., Wu Q. Exchange of groundwater and surface-water mediated by permafrost



response to seasonal and longterm air temperature variation. *Geophysical Research Letters*. 2011;38(14):L14402. <https://doi.org/10.1029/2011gl047911>.

9. Nyamdorj S., Myagmarjav M., Batsaikhan A., Tamir Ts. Some results of studying cracks and cavities formed due to the degradation and disappearance of permafrost zone of the Nalayh town in Mongolia. *Vestnik Grazhdanskikh Inzhenerov = Bulletin of Civil Engineers*. 2019;3:52-62. (In Russ.). <https://doi.org/10.23968/1999-5571-2019-16-3-52-62>.

10. Woo M. *Permafrost hydrology*. Berlin: Springer Science & Business Media; 2012. 564 p.

11. Pavlov A. V. *Thermal physics of landscapes*. Novosibirsk: Nauka; 1979. 285 p. (In Russ.).

12. Shepelev V. V. *Suprapermafrost waters in the cryolithozone*. Novosibirsk: Geo; 2011. 169 p. (In Russ.).

13. Zheleznyak M. N. *Geotemperature field and permafrost zone in the southeast of the Siberian platform*. Novosibirsk: Nauka; 2005. 227 p. (In Russ.).

14. Liu G., Zou D., Yang B., Du E., Zhou H., Xiao Y., et al. Preliminary results of permafrost investigation on northern and southern slopes of Mt. Geladandong, interior Qinghai-Tibet Plateau. *Journal of Glaciology and Geocryology*. 2022;44(1):83-95. (In Chinese). <https://doi.org/10.7522/j.issn.1000-0240.2022.0021>.

15. Luo J., Lin Z., Yin G., Niu F., Liu M., Gao Z., et al. The ground thermal regime and permafrost warming at tow upland, sloping, and undisturbed sites, Kunlun Mountain, Qinghai-Tibet Plateau. *Cold Regions Science and Technology*. 2019;167:102862. <https://doi.org/10.1016/j.coldregions.2019.102862>.

2019.102862.

16. Wu Q., Liu Y., Hu Z. The thermal effect differential so-lar exposure on embankments along the Qinghai-Tibet Railway. *Cold Regions Science and Technology*. 2011; 66(1):30-38. <https://doi.org/10.1016/j.coldregions.2011.01.001>.

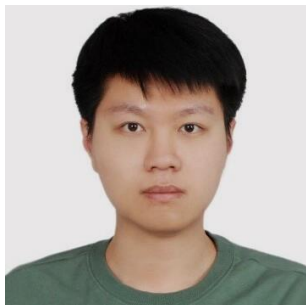
17. Chou Y., Sheng Y., Li Y., Wei Z., Zhu Y., Li J. Sunny-shady slope effect on the thermal and deformation stability of the highway embankment in warm permafrost regions. *Cold Regions Science and Technology*. 2010;63(1-2):78-86. <https://doi.org/10.1016/j.coldregions.2010.05.001>.

18. Ishikawa M., Sharkhuu N., Zhang Y., Kadota T., Ohata T. Ground thermal and moisture conditions at the southern boundary of discontinuous permafrost, Mongolia. *Permafrost and Periglacial Processes*. 2005;16(2):209-216. <https://doi.org/10.1002/ppp.483>.

19. Baoleerqimuge, Shu C., Ma X., Liu Z., Li C., Zhang Z. Analysis on the spatial-temporal characteristics of accumulated snow in the northern forestry region of greater khingan range from 1975 to 2016. *Journal of Inner Mongolia Agricultural University (Natural Science Edition)*. 2021;42(2):27-35. (In Chinese). <https://doi.org/10.16853/j.cnki.1009-3575.2021.02.006>.

20. Lu A., Pang D., Ge Y., He Y., Pang H., Yuan L. Effect of landform on seasonal temperature structures across China in the past 52 years. *Journal of Mountain Science*. 2006;3(2):158-167. <https://doi.org/10.1007/s11629-006-0158-x>.

Информация об авторах / Information about the authors



Юй Мяо,
аспирант,
Горный институт,
Северо-Восточный федеральный университет им. М. К. Аммосова,
г. Якутск, Россия,
hss_yumiao@126.com.

Miao Yu,
Postgraduate Student,
Mining Institute,
Ammosov North-Eastern Federal University,
Yakutsk, Russia,
hss_yumiao@126.com.



Павлова Надежда Анатольевна,
кандидат геолого-минералогических наук,
ведущий научный сотрудник Лаборатории подземных вод
и геохимии крилитонозы,
Институт мерзлотоведения им. П. И. Мельникова СО РАН,
г. Якутск, Россия,
pavlova@mpi.ysn.ru,
<https://orcid.org/0000-0001-5473-7778>.

Nadezhda A. Pavlova,
Cand. Sci. (Geol. & Mineral.),
Leading Researcher of the Laboratory of Permafrost Groundwater and Geochemistry,
Melnikov Permafrost institute SB RAS,
Yakutsk, Russia,
pavlova@mpi.ysn.ru,
<https://orcid.org/0000-0001-5473-7778>.



Дай Чанлэй,
доктор геолого-минералогических наук, профессор,
директор,
Академия гидравлики и электроэнергетики,
Хэйлунцзянский университет,
г. Харбин, Китай,
daicahgnlei@126.com.
Changlei Dai,
Dr. Sci. (Geol. & Mineral.), Professor,
Director,
School of Hydroelectric Power,
Heilongjiang University,
Harbin, China,
daicahgnlei@126.com.

Вклад авторов / Contribution of the authors

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

Конфликт интересов / Conflict of interests

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

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

Информация о статье / Information about the article

Статья поступила в редакцию 14.07.2022; одобрена после рецензирования 05.10.2022; принята к публикации 08.11.2022.
The article was submitted 14.07.2022; approved after reviewing 05.10.2022; accepted for publication 08.11.2022.

РАЗВЕДКА И РАЗРАБОТКА
МЕСТОРОЖДЕНИЙ ПОЛЕЗНЫХ ИСКОПАЕМЫХ

Научная статья

УДК 622.243.2

<https://doi.org/10.21285/2686-9993-2022-45-4-424-435>Разработка долот для направленного бурения
в сложных горно-геологических условияхДмитрий Викторович Лысаков^a^aСибирский федеральный университет, г. Красноярск, Россия

Резюме. Целью представленного исследования стало повышение эффективности ведения работ по направленному бурению с применением отклонителей непрерывного действия в сложных горно-геологических условиях. В ходе исследования были описаны горно-геологические условия, в которых происходит снижение эффективности работы отклонителей непрерывного действия, а также причины, по которым данное снижение наблюдается. Можно отметить, что значительные проблемы возникают при использовании отклонителей непрерывного действия фрезерующего типа для забуривания дополнительных стволов скважин в твердых горных породах с искусственных забоев из цементных смесей и искривлении скважин в интервалах ослабленных горных пород естественного забоя. В этом случае наблюдается снижение точности искривления вследствие препятствующей набору кривизны повышенной скорости углубки, которую сложно регулировать параметрами режима бурения. Другой проблемой, вызывающей снижение точности искривления скважин при использовании отклонителей фрезерующего типа в породах, имеющих высокую твердость, является отклонение плоскости набора кривизны вследствие возникающего при фрезеровании стенки скважины дезориентирующего усилия. В исследовании кратко представлены существующие технологии и технические средства, применение которых направлено на повышение работы отклонителей в сложных горно-геологических условиях, в том числе за счет использования долот со специальной конструкцией. Автор предложил и запатентовал серию новых технических средств (к коим относятся долота) и технологических решений, позволяющих эффективно бороться с падением результативности работы отклонителей непрерывного действия при искривлении скважины в горных породах, имеющих высокую твердость, при этом в разработанных средствах были учтены недостатки уже существующих технических средств.

Ключевые слова: искривление скважины, искусственный забой, отклонитель, горная порода, долото

Для цитирования: Лысаков Д. В. Разработка долот для направленного бурения в сложных горно-геологических условиях // Науки о Земле и недропользование. 2022. Т. 45. № 4. С. 424–435. <https://doi.org/10.21285/2686-9993-2022-45-4-424-435>.

EXPLORATION AND DEVELOPMENT OF MINERAL DEPOSITS

Original article

Development of bits for directional drilling
in complex mining and geological conditionsDmitry V. Lysakov^a^aSiberian Federal University, Krasnoyarsk, Russia

Abstract. The purpose of the study is to improve the efficiency of directional drilling using continuous whipstocks in difficult mining and geological conditions. The research involves the description of mining and geological conditions featuring decreased efficiency of continuous whipstock operation as well as the reasons why the decrease is observed. It should be noted that significant problems arise when using the milling-type continuous whipstocks for sidetracking in hard rocks from the plug back total depths of cement mixtures and well deviations in the intervals of normal face weakened rocks. In this case, there is a decrease in deviation accuracy, due to the increased sinking speed that prevents curvature accumulation and which is difficult to control by the drilling mode parameters. Another problem that decreases the well deviation accuracy when using milling-type whipstocks in hard rocks is the deviation of the drift angle build up plane due to the disorienting



force that occurs during milling of the borehole wall. The study briefly dwells upon the existing technologies and engineering means, the use of which is aimed at improving the whipstock performance in complex mining and geological conditions, including through the use of bits with a special design. The author has proposed and patented a series of new technical means (bits) and technological solutions that effectively deal with the drop in the performance of continuous whipstocks in the well deviated in hard rocks. Moreover, the developed means took into account the shortcomings of current technical equipment.

Keywords: wellbore deviation, plug back total depth, whipstock, rock, bit

For citation: Lysakov D. V. Development of bits for directional drilling in difficult mining and geological conditions. *Nauki o Zemle i nedropol'zovanie = Earth sciences and subsoil use*. 2022;45(4):424-435. (In Russ.). <https://doi.org/10.21285/2686-9993-2022-45-4-424-435>.

Введение

На основе опыта разведки месторождений полезных ископаемых было установлено, что метод направленного бурения позволяет существенно повысить качество и снизить стоимость геолого-разведочных работ, увеличить эффективность эксплуатации углеводородных залежей, решить многие сложнейшие задачи при реализации геотехнологий и прокладке коммуникаций. Основным техническим средством при направленном бурении скважин, позволяющим производить оперативное, точное и качественное искривление скважин, являются отклонители непрерывного действия [1–3].

В то же время многолетний опыт работ по направленному бурению позволил выявить сложные горно-геологические условия, в которых использование отклонителей приводит к снижению результативности искривления и авариям. Так, например, при использовании отклонителей фрезерующего типа в породах, имеющих высокую твердость, наблюдается снижение точности искривления вследствие возникающего при фрезеровании стенки скважины дезориентирующего усилия. Раскрепление отклонителей непрерывного действия в твердых, очень твердых и абразивных горных породах, когда радиальные зазоры между стенкой скважины и вооружением долота минимальны, приводит к заклиниванию породоразрушающего инструмента.

Скважины, пробуренные в твердых и очень твердых горных породах, как правило, имеют минимальные радиальные зазоры между вооружением алмазного инструмента и стенкой скважины. При этом нередко случаи, когда вследствие повышенного износа вооружения алмазного инструмента диаметр скважины может несколько заужаться [4–7]. Использование отклонителей непрерывного

действия в таких скважинах ограничено в связи с большим риском заклинивания породоразрушающего инструмента при раскреплении.

Работоспособность отклонителей, реализующих искривление за счет асимметричного разрушения забоя, в отличие от работоспособности отклонителей фрезерующего типа напрямую зависит от величины угла наклона породоразрушающего инструмента относительно оси скважины (обычно угол наклона составляет 1–2°) [8–11]. В отклонителях фрезерующего типа интенсивность набора кривизны не зависит от наклона породоразрушающего инструмента, однако наклон может быть вызван прогибом вала-ротора отклонителя [13–15].

Проведенное графоаналитическое исследование позволило установить, что при наклоне долота на 1–3° диаметр матрицы в плоскости, перпендикулярной оси скважины, увеличивается с 76 до 77,06 мм соответственно. В условиях зауженного ствола скважины это приводит к тому, что при перекосе долота его диаметр в сечении, перпендикулярном оси скважины, начинает превышать диаметр скважины и происходит заклинивание. Если сила сцепления распорного механизма с горной породой окажется меньше, чем у вооружения долота, то при передаче на него крутящего момента произойдет проворот корпуса отклонителя в скважине и потеря ориентации снаряда. В более редких случаях, когда силы сцепления вооружения долота и распорного механизма с горной породой велики, происходит поломка вала отклонителя, которая приводит к авариям.

Обеспечить возможность свободного перекоса породоразрушающего инструмента при раскреплении отклонителя можно за счет увеличения радиального зазора между воору-



жением долота и стенкой скважины. Для этого производится проработка диаметра скважины методом локального расширения диаметра на высоте 5–10 см от забоя. Проведенные ранее исследования, позволили установить, что для проработки диаметра ствола скважины могут использоваться долота типа ДДА. Износ 38 долот различного диаметра показал, что лапа долот со стороны большей шарошки изнашивается более интенсивно, а разность высот лап после отработки составила 1–3 мм. Причина неравномерного износа лап заключается в различном размере шарошек долота. В процессе бурения шарошка, имеющая меньший размер и, следовательно, меньшую площадь контакта с горной породой, разрушает забой более активно¹.

Таким образом, данная конструктивная особенность приводит к тому, что долото прижимается к стенке скважины большей шарошкой и активно ее фрезерует (например, из опытных данных видно, что при бурении скважины долотом диаметром 59 мм диаметр скважины получает разработку до 61 мм). С другой стороны, применение долот ДДА приводит к изгибу буровой компоновки, ее износу и потере фрезерующей способности² [14–17].

На этой основе была разработана конструкция алмазного бурового долота со специальной схемой размещения бокового и торцевого вооружения, которое при работе не имеет недостатков, характерных для долот типа ДДА, и при этом позволяет вести эффективную проработку диаметра скважины.

При использовании отклонителей фрезерующего типа в твердых горных породах в процессе фрезерования стенки скважины возникает дезориентирующее усилие P_d , в результате чего наблюдается смещение плоскости набора кривизны в сторону, противоположную вращению долота. В связи с этим при ориентации отклонителя возникает необходимость учитывать угол отклонения плоскости набора кривизны φ , задавая некоторое упреждение этого отклонения смещением вправо от требуемой плоскости набора кривизны. Угол возможного отклонения φ определяется

исходя из опыта использования отклонителя в схожих горно-геологических условиях.

На рис. 1 представлена схема, поясняющая процесс смещения плоскости набора кривизны в твердых горных породах. Под действием осевой нагрузки распорный механизм с роликами-катками 3 срабатывает и выдвигается до упора в стенку скважины с усилием P_p . В результате взаимодействия распорного механизма со стенкой скважины на породоразрушающем инструменте 2 возникает отклоняющее усилие $P_{откл}$ и под действием крутящего момента осуществляется фрезерование стенки скважины боковым вооружением долота 1 в заданном оператором направлении I.

В процессе работы боковых резцов возникает дезориентирующее усилие P_d , Н, которое вызвано сопротивлением резанию-скалыванию горной породы резцами, прижатыми к стенке скважины. При этом дезориентирующее усилие имеет прямую зависимость с отклоняющим усилием $P_{откл}$, даН:

$$P_d = \frac{P_{откл}}{R_d},$$

где R_d – радиус торца долота, м.

Одновременное действие на долото отклоняющего и дезориентирующего усилия приводит к появлению результирующего усилия P . В результате того, что на породоразрушающий инструмент оказывают влияние силы, не совпадающие по направлению, в процессе искривления происходит смещение плоскости набора кривизны от направления I, заданного оператором при постановке задачи, в направлении искривления II на некоторый угол φ .

Повысить точность искривления скважин в сложных горно-геологических условиях достаточно трудно в связи с отсутствием специальных технических средств и эффективных технологий, что делает проблему снижения точности искривления при использовании отклонителей фрезерующего типа актуальной и требующей решения, поскольку технологии искусственного искривления являются основой прогрессивных методов геолого-разведочных работ.

¹ Нескоромных В. В. Проходка направленных скважин в сложных геологических условиях с применением растворов на основе отходов химпредприятий: автореф. ... дис. канд. техн. наук. Иркутск: Изд-во ИГИ, 1985. 69 с.

² Там же.

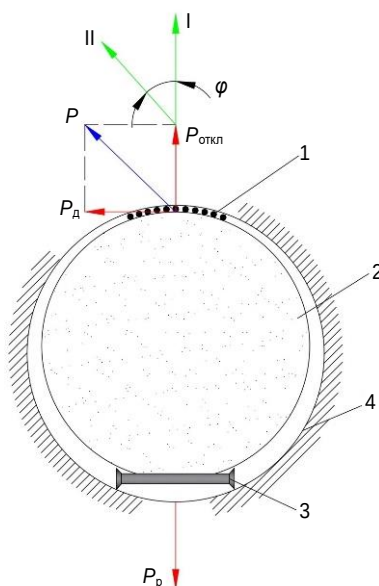


Рис. 1. Схема, иллюстрирующая процесс отклонения плоскости искривления:

1 – боковое вооружение долота; 2 – долото; 3 – ролики-катки распорного устройства; 4 – стенка скважины
 φ – угол возможного отклонения, град.; P – результирующее усилие, даН; $P_{откл}$ – отклоняющее усилие, даН;
 $P_{д}$ – дезориентирующее усилие, Н; $P_{р}$ – распорное усилие, даН
 I, II – заданные направления

Fig. 1. Diagram demonstrating the curvature plane deviation:

1 – lateral drill bit cutting structure; 2 – bit; 3 – track rollers of the anchoring system; 4 – borehole wall
 φ – angle of possible deviation, degrees; P – resulting force, daN; $P_{откл}$ – deviation force, daN;
 $P_{д}$ – disorienting force, N; $P_{р}$ – thrust force, daN
 I, II – given directions

Материалы и методы исследования

В связи с тем, что уже существующие технологии и технические средства не обладают достаточной эффективностью, целью данного исследования стало повышение эффективности ведения работ по направленному бурению с применением отклонителей непрерывного действия в сложных горно-геологических условиях. Для реализации поставленной цели автором был разработан ряд технических средств, таких как долото с шарниром и долота со специальной схемой размещения вооружения как на боковом, так и на торцевом участках.

Результаты исследования

Конструкция долота для локального расширения диаметра ствола скважины (рис. 2) включает алмазосодержащую матрицу, торец которой разделен на основную 3 и дополнительную 4 части. Основная часть ограничена углом β и имеет стандартное насыщение алмазными резцами, при этом дополнительная часть имеет меньшее насыщение алмазными

резцами. Боковое вооружение разделено на зоны с пониженной, стандартной и повышенной насыщенностью. Зона со стандартной насыщенностью 6 с одной стороны ограничена углом α с фрезерующим вооружением, имеющим повышенную насыщенность 5, а с другой – боковым вооружением 7 на дополнительной части, имеющим пониженное насыщение резцами [18].

Под действием осевого усилия и крутящего момента долото разрушает горную породу на забое, при этом разделение торцевой части долота на зоны с различной насыщенностью алмазными резцами приводит к неустойчивости реакций сил резания-скалывания породы резцами F и F_y , что, в свою очередь, приводит к появлению результирующей сил резания-скалывания ΔF , которая смещена от геометрической оси торца долота O на некоторое расстояние X . При этом точка O_1 становится центром мгновенного вращения долота. В результате долото вращается, прижимаясь к стенке скважины участком с основным фрезерующим вооружением, активно прорабатывая ее.

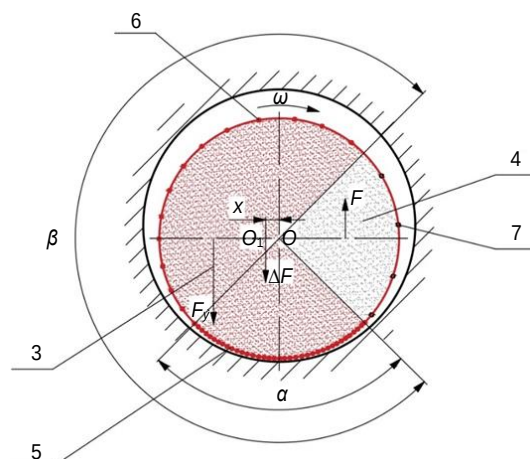


Рис. 2. Торцевая часть алмазосодержащей матрицы долота со специальной схемой размещения вооружения:

3 – участок долота, имеющий стандартное насыщение алмазными резцами; 4 – участок долота, имеющий насыщение алмазными резцами меньше стандартного; 5 – фрезерующее вооружение, имеющее повышенное насыщение алмазными резцами; 6 – фрезерующее вооружение, имеющее стандартное насыщение алмазными резцами; 7 – фрезерующее вооружение, имеющее насыщение алмазными резцами меньше стандартного; α – угол, обозначающий зону усиленного фрезерующего вооружения, град.; β – угол, обозначающий зону фрезерующего вооружения со стандартной насыщенностью, град.; ω – направление вращения долота; X – расстояние, м; O – геометрическая ось торца долота; F – сила резания, Н; F_y – сила скалывания, Н; ΔF – результирующая сил резания-скалывания

Fig. 2. The face of the diamond-containing matrix of the bit with a special layout of the drill bit cutting structure:

3 – standard diamond coated bit section; 4 – less than standard diamond coated bit section; 5 – milling cutting structure of the increasingly diamond coated drill bit; 6 – milling cutting structure of the standard diamond coated drill bit; 7 – milling cutting structure of the less than standard diamond coated drill bit; α – angle denoting the zone of the milling structure with reinforced coating, degrees; β – angle denoting the zone of the milling structure with standard coating, degrees; ω – bit rotation direction; X – distance, m; O – geometric axis of the bit face; F – cutting force, N; F_y – shearing force, N; ΔF – the resultant of cutting-shearing forces

Для оценки величины результирующей сил резания-скалывания ΔF при бурении долотом с эксцентриситетом режущей части использовалось следующее выражение

$$\Delta F = \frac{\pi(h+0,25\sqrt{dh})^2 \sigma_{ск} S_d}{2 \operatorname{tg} \gamma_{ск} P_{ос}} \left(\frac{n_b}{S_{ст}} - \frac{n_m}{S_m} \right) f \frac{P_{ос}}{S_d} (S_{ст} - S_m),$$

где h – глубина внедрения алмазного резца в породу, м; d – диаметр алмазного резца, м; $\sigma_{ск}$ – предел прочности на скалывание породы, Па; S_d – площадь алмазосодержащей матрицы долота, м²; $\gamma_{ск}$ – угол скалывания породы перед передней гранью резца, град; $P_{ос}$ – осевая нагрузка, даН; n_b – количество прижатых к стенке скважины боковых алмазных резцов; n_m – число алмазных резцов на участке торца долота, имеющего насыщение алмазными резцами ниже стандартного; $S_{ст}$ – площадь алмазосодержащей матрицы долота, имеющая стандартное насыщение резцами, м²; S_m – площадь алмазосодержащей матрицы долота, имеющая насыщение резцами ниже стандартного, м².

Отсюда $S_{ст}$ и S_m определяются из формулы:

$$S = \frac{3,14 R_d^2}{360} \alpha K_{п},$$

где R_d – радиус торца долота, м; α – центральный угол сектора матрицы с насыщением алмазными резцами ниже стандартного и стандартным, град.; $K_{п}$ – коэффициент, учитывающий площадь промывочных каналов.

Так как геометрически торец алмазного долота представляет собой окружность, формула площади торцевой части долота S_d , м², будет иметь вид:

$$S_d = 3,14 R_d^2 K_{п},$$

где R_d – радиус торца долота, м; $K_{п}$ – коэффициент, учитывающий площадь промывочных каналов.

При помощи представленных зависимостей была рассчитана величина дисбалансной силы долота с эксцентриситетом резания торцевой части. Полученные в ходе расчетов данные представлены в табл. 1.



Таблица 1. Расчеты дисбалансной силы долота для различных диаметров долота при различных площадях участков матрицы с меньшей насыщенностью алмазными резцами
Table 1. Calculations of the bit unbalance force for various bit diameters at different areas of the matrix sections with lower saturation with diamond cutters

Угол распространения участка матрицы долота, имеющего пониженную насыщенность алмазными резцами, град.	Диаметр долота, мм		
	59	76	96
	Значение дисбалансной силы долота, даН		
90	42,46	42,49	42,62
108	50,99	51,02	51,05
126	59,49	59,62	59,66
144	67,98	68,01	68,04
162	76,48	76,48	76,54
180	82,8	82,84	82,89

Из данных, представленных в табл. 1, можно сделать вывод, что дисбаланс сил резания имеет минимальную зависимость от диаметра породоразрушающего инструмента при их идентичной конструкции. При этом величина результирующей силы в основном зависит от разности площадей торца долота с большей и меньшей насыщенностью алмазами.

С другой стороны, предотвратить заклинивание породоразрушающего инструмента при использовании отклонителей фрезерующего типа можно за счет внедрения «гибкого» соединения между валом-ротором отклонителя и корпусом долота. Такое техническое решение позволит устранить перекося породоразрушающего инструмента, вызванного прогибом вала-ротора.

Для реализации поставленной цели разработана и запатентована конструкция алмазного породоразрушающего инструмента, в которой «гибкое» соединение с валом отклони-

теля реализуется за счет шарнира, выполненного в корпусе долота. Долото (рис. 3) состоит из матрицы 2 и корпуса 3, который при помощи шлицевого соединения 4 взаимодействует с шарниром 5. Шарнир, в свою очередь, в нижней части опирается на сферическую проточку 6, а в верхней при помощи резьбы 7 навинчен на вал отклонителя. Гайка 8 и резиновый элемент 9 служат для закрепления шарнира в корпусе долота. Резиновый элемент служит также для герметизации внутренней полости корпуса.

При создании отклоняющего усилия долото своим боковым вооружением прижимается к стенке скважины. Одновременно с этим сила сопротивления горной породы, направленная в сторону, противоположную отклоняющему усилию, вызывает некоторый прогиб вала отклонителя. При этом шарнир, закрепленный на валу отклонителя, также получает некоторый наклон, но за счет сферической проточки в матрице и наличия зазоров с шайбой

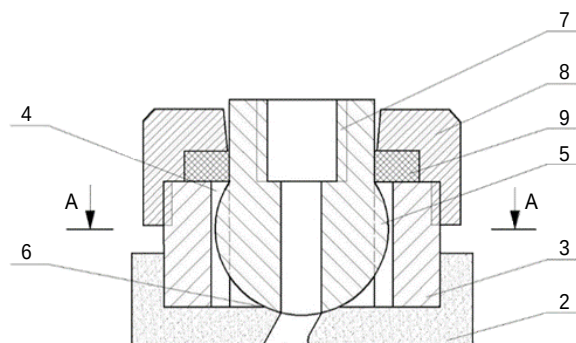


Рис. 3. Долото:

2 – матрица; 3 – корпус; 4 – шлицевое соединение; 5 – шарнир; 6 – проточка; 7 – резьба;
8 – гайка; 9 – резиновый элемент

Fig. 3. Bit:

2 – matrix; 3 – housing; 4 – spline joint; 5 – hinge joint; 6 – groove; 7 – thread;
8 – nut; 9 – rubber element



не передает наклон на корпус долота. Крутящий момент с шарнира на корпус передается за счет шлицевого соединения.

Объединение корпуса долота с гайкой при помощи резьбового соединения обеспечивает возможность замены изношенной алмазосодержащей матрицы с корпусом на новую без замены шарнира [19].

Для определения прочности и слабых элементов конструкции долота было произведено компьютерное 3D-моделирование в среде ANSYS при условии использования в нем различных по твердости материалов. Анализ проводился с помощью модуля Static Structural – были рассмотрены деформации и основные напряжения, возникающие в шарнирах из титана, легированной стали и холодной нормализованной стали под действием осевой нагрузки и крутящего момента (рис. 4).

По итогам компьютерного моделирования было установлено, что в процессе бурения действие ударных нагрузок может вызвать частичное или полное разрушение сферической проточки в зоне контакта с шарниром. Под частичным разрушением понимается образование сколов на поверхности проточки, что вызовет повышенный износ нижней части шарнира. Полное разрушение матрицы приведет к аварии.

Учитывая данные факторы, конструкция долота была доработана путем переноса сферической проточки из матрицы в корпус долота. В этом случае осевая нагрузка от

шарнира к матрице будет передаваться по большей площади.

Для уменьшения величины отклонения плоскости набора кривизны при искривлении скважин отконителем фрезерующего типа в горных породах, имеющих высокую твердость, разработана конструкция долота, схема расположения бокового вооружения которого способна снизить влияние дезориентирующего усилия на плоскость искривления (рис. 5).

Корпус 2 долота включает резьбу 1 и матрицу 3, на боковой поверхности которой алмазосодержащие сектора и промывочные каналы располагаются под некоторым наклоном относительно оси долота. Угол наклона боковых секторов матрицы, который позволяет наиболее эффективно компенсировать дезориентирующее усилие, определяется в основном из сил, действующих на долото в процессе фрезерования стенки скважины и глубины внедрения алмазных резцов в породу [20].

Используя разработанную методику, можно определить оптимальный угол наклона в различных горных породах и при различных параметрах режима бурения. Для начала следует оценить угол отклонения плоскости набора кривизны φ , град., при помощи выражения

$$\varphi = \arctg \frac{P_d}{P_{откл}},$$

где P_d – дезориентирующее усилие, Н; $P_{откл}$ – отклоняющее усилие, даН.

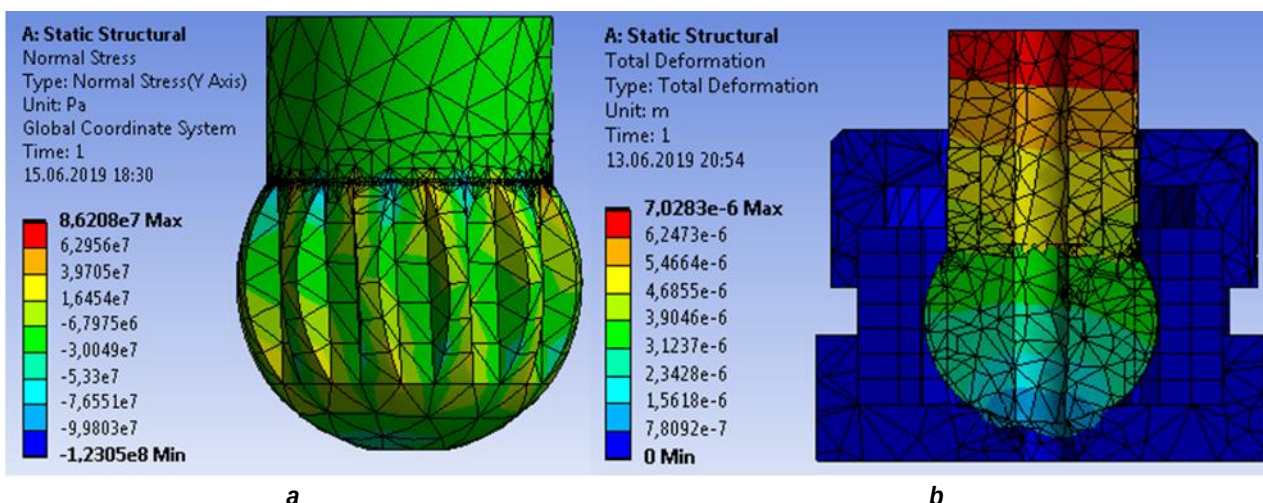


Рис. 4. Модель распределения напряжений в шарнире из холодной нормализованной стали (a) и модель деформации шарнира (b)

Fig. 4. A stress distribution model in a cold normalized steel hinge (a) and a hinge deformation model (b)

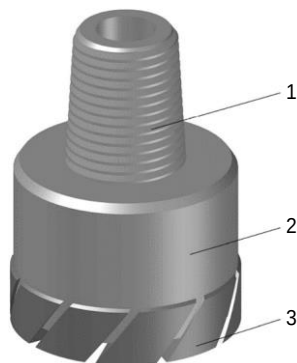


Рис. 5. Алмазное долото с наклонным боковым вооружением:

1 – резьба; 2 – корпус; 3 – матрица

Fig. 5. Diamond bit with inclined lateral cutting structure:

1 – thread; 2 – housing; 3 – matrix

Поскольку появление дезориентирующего усилия P_d , Н, обусловлено сопротивлением резанию-скалыванию горной породы резцами, располагающимися на боковой поверхности алмазосодержащих штабиков, формула для определения его величины принимает вид:

$$P_d = \frac{\pi \cdot (h + 0.25\sqrt{d \cdot h})^2 \cdot n_b}{2\text{tg}\gamma_{\text{СК}}} \cdot \sigma_{\text{СК}} + P_{\text{откл}} \cdot \mu = P_a + P_{\text{откл}} \cdot \mu,$$

где h – глубина внедрения алмазного резца в породу, мм; d – диаметр алмазного резца, мм; n_b – количество прижатых к стенке скважины боковых алмазных резцов; $\gamma_{\text{СК}}$ – угол скалывания породы перед передней гранью резца, град.; $\sigma_{\text{СК}}$ – предел прочности горной породы на скалывание, даН/мм²; $P_{\text{откл}}$ – отклоняющее усилие, даН; μ – коэффициент трения алмазного резца о породу; P_a – усилие резания-скалывания горной породы алмазным резцом, даН.

Отсюда глубина внедрения алмазного резца в породу h , м, вычисляется следующим образом:

$$h = 0,5d - \sqrt{0,25d^2 - \frac{P}{\pi \cdot p_{\text{ш}} \cdot (1 + \text{tg}\varphi_{\text{п}})}},$$

где d – диаметр алмазного резца, мм; P – результирующее усилие, даН; $p_{\text{ш}}$ – твердость горной породы, даН/мм²; $\varphi_{\text{п}}$ – угол внутреннего трения горной породы, град.

Принцип работы долота основан на механизме силового взаимодействия торцевых и боковых алмазных резцов с горной породой под действием осевого и отклоняющего усилий. Учитывая, что при наклоне алмазосодержащих штабиков часть осевого усилия ком-

пенсруется прижатием резцов, формула для определения действующего на каждый из резцов усилия P_i , даН, принимает вид:

$$P_i = \frac{P_{\text{ос}} + P_{\text{откл}} \cdot \mu}{n_{\text{т}} + n_{\text{б}}},$$

где $P_{\text{ос}}$ – осевое усилие, даН; $P_{\text{откл}}$ – отклоняющее усилие, даН; μ – коэффициент трения алмазного резца о породу; $n_{\text{т}}$ – количество торцевых алмазных резцов; $n_{\text{б}}$ – количество боковых алмазных резцов.

Одновременно с этим внедрению боковых резцов препятствует реакция со стороны горной породы P_c . Учитывая, что сопротивление со стороны породы P_c , даН, вызвано в основном упругими реакциями, которые могут быть определены через коэффициент внутреннего трения, сопротивление, действующее на боковые резцы, может быть рассчитано через выражение:

$$P_c = n_b \cdot P_i (1 - \text{tg}\varphi),$$

где n_b – количество боковых алмазных резцов; P_i – действующее на каждый из резцов усилие, даН; $\text{tg}\varphi$ – коэффициент внутреннего трения.

Боковые резцы сектора матрицы расположены под наклоном, часть осевого усилия трансформируется в горизонтальную силу P_r , Н, величина которой с учетом угла наклона определяется следующим образом:

$$P_r = P_c \cdot \sin \gamma \cdot \cos \gamma = n_b \cdot P_i (1 - \text{tg}\varphi) \cdot \sin \gamma \cdot \cos \gamma = \frac{n_b \cdot (P_{\text{ос}} - P_{\text{откл}} \cdot \mu) \cdot (1 - \text{tg}\varphi) \cdot \sin 2\gamma}{2(n_{\text{т}} + n_{\text{б}})},$$

где P_c – сопротивление, действующее на боковые резцы со стороны горной породы, даН; γ – угол наклона, град.; n_b – количество боковых алмазных резцов; P_i – действующее на каждый из резцов усилие, даН; $\text{tg}\varphi$ – коэффи-



коэффициент внутреннего трения; $P_{ос}$ – осевое усилие, даН; $P_{откл}$ – отклоняющее усилие, даН; μ – коэффициент трения алмазного резца о породу; n_T – количество торцевых алмазных резцов.

Таким образом, для того, чтобы предотвратить смещение плоскости набора кривизны и повысить точность искривления, необходимо добиться такого угла наклона боковых секторов матрицы (рис. 6), при которых величина горизонтальной силы полностью компенсировала бы действие дезориентирующего усилия:

$$P_a + P_{откл} \cdot \mu = \frac{n_6 \cdot (P_{ос} - P_{откл} \cdot \mu) \cdot (1 - \operatorname{tg} \varphi) \cdot \sin 2\gamma}{2(n_T + n_6)},$$

где P_a – усилие резания-скалывания горной породы алмазным резцом, даН; $P_{ос}$ – осевое усилие, даН; $P_{откл}$ – отклоняющее усилие, даН; μ – коэффициент трения алмазного резца о породу; γ – угол наклона боковых секторов матрицы, град.; n_T – количество торце-

вых алмазных резцов; n_6 – количество боковых алмазных резцов.

Отсюда величина угла наклона алмазосодержащего штабика γ , град., вычисляется следующим образом:

$$\gamma = \frac{1}{2} \arcsin \frac{2(n_T + n_6) \cdot (P_a + P_{откл} \cdot \mu)}{n_6 \cdot (P_{ос} - P_{откл} \cdot \mu) \cdot (1 - \operatorname{tg} \varphi)},$$

где n_T – количество торцевых алмазных резцов; n_6 – количество боковых алмазных резцов; P_a – усилие резания-скалывания горной породы алмазным резцом, даН; $P_{откл}$ – отклоняющее усилие, даН; μ – коэффициент трения алмазного резца о породу; $P_{ос}$ – осевое усилие, даН; $\operatorname{tg} \varphi$ – коэффициент внутреннего трения.

Таким образом, на основе разработанной методики был рассчитан оптимальный угол наклона боковой поверхности алмазосодержащих секторов в различных горно-геологических условиях при разных параметрах режима бурения. Результаты расчетов представлены в табл. 2.

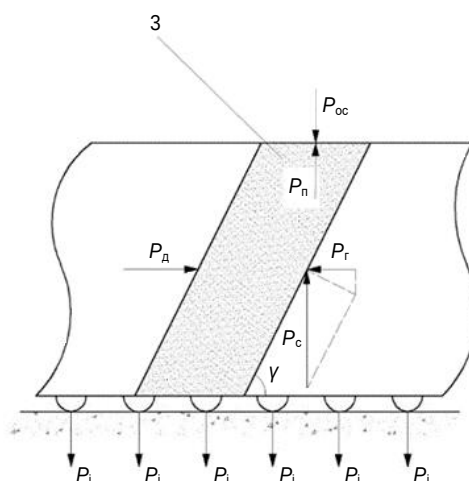


Рис. 6. Схема силового воздействия на наклонный алмазосодержащий штабик в процессе работы:

3 – боковой сектор матрицы

$P_{ос}$ – осевое усилие, даН; P_n – сила прижатия резцов, Н; $P_д$ – дезориентирующее усилие, Н; $P_г$ – горизонтальная сила, Н; $P_с$ – сопротивление, действующее на боковые резцы со стороны горной породы, даН; γ – угол наклона боковых секторов матрицы, град.; P_i – действующее на каждый из резцов усилие, даН

Fig. 6. Diagram of force impact on the inclined diamond-containing rod in operation:

3 – matrix lateral sector

$P_{ос}$ – axial force, daN; P_n – cutter pressing force, N; $P_д$ – horizontal force, N; $P_г$ – disorienting force, N; $P_с$ – rock resistance acting on the side cutters, daN; γ – inclination angle of the side sectors of the matrix, degrees; P_i – force acting on each cutter, daN

Таблица 2. Расчетные значения угла наклона алмазосодержащих штабиков

Table 2. Estimated values of the inclination angle of diamond-containing rods

Известняк					Диорит					Сиенит				
$P_{откл}$, даН	$P_{ос}$, даН	P_d , Н	P_g , Н	γ , град.	$P_{откл}$, даН	$P_{ос}$, даН	P_d , Н	P_g , Н	γ , град.	$P_{откл}$, даН	$P_{ос}$, даН	P_d , Н	P_g , Н	γ , град.
60	500	79,24	78,28	52	80	600	99,24	99,58	41	120	800	134,4	134	39



Согласно расчетам, угол наклона бокового вооружения, компенсирующий действие дезориентирующего усилия, в зависимости от выбранных режимов бурения составит для известняка, диорита и сиенита 52, 41 и 39° соответственно.

Заключение

Использование предложенных в статье технических средств позволяет повысить производительность работ по направленному бурению в сложных горно-геологических условиях. Алмазное буровое долото с боковым наклонным вооружением позволит увеличить точность искривления скважин при использовании отклонителей фрезерующего типа с использованием алмазных буровых долот за счет

компенсирования дезориентирующего усилия. Бурение интервалов постановки отклонителей алмазными долотами с эксцентриситетом режущей части торца матрицы будет способствовать некоторому расширению ствола скважины и приведет к созданию геометрии забоя, в котором заклинивание долота при постановке отклонителей непрерывного действия будет исключено. Использование в составе отклонителей фрезерующего типа долота с шарниром позволит в условиях, когда диаметр скважины имеет минимальную работанность, выполнить искривление скважины без предварительного расширения диаметра и сэкономить время и стоимость работ по направленному бурению.

Список источников

1. Ahmed A., Islam M. A., Alam M. Z., Quazi H. S. Surface settlement induced by horizontal directional drilling // *Underground Space*. 2023. Vol. 8. P. 94–108. <https://doi.org/10.1016/j.undsp.2022.05.001>.
2. Huang W., Wang G., Gao D. A method for predicting the build-up rate of 'push-the-bit' rotary steering system // *Natural Gas Industry B*. 2021. Vol. 8. Iss. 6. P. 622–627. <https://doi.org/10.1016/j.ngib.2021.11.010>.
3. Yantao B., Gonghui L., Ghua D., Jun L. Finite element analysis of effect of flexible pupjoints on push-the-bit rotary steering deflecting force // *Chemistry and Technology of Fuels and Oils*. 2020. Vol. 56. P. 218–225. <https://doi.org/10.1007/s10553-020-01132-8>.
4. Gu P., Zhu C., Yu Y., Liu D., Tao Z., Wu Y. Evaluation and prediction of drilling wear based on machine vision // *The International Journal of Advanced Manufacturing Technology*. 2021. Vol. 114. Iss. 11. P. 2055–2074. <https://doi.org/10.1007/s00170-021-06887-w>.
5. Che D., Zhu W.-L., Ehmann K. F. Chipping and crushing mechanisms in orthogonal rock cutting // *International Journal of Mechanical Sciences*. 2016. Vol. 119. P. 224–236. <https://doi.org/10.1016/j.ijmecsci.2016.10.020>.
6. Wang X., Wang Z., Wang D., Chai L. A novel method for measuring and analyzing the interaction between drill bit and rock // *Measurement*. 2018. Vol. 121. P. 344–354. <https://doi.org/10.1016/j.measurement.2018.02.045>.
7. Gu P., Zhu C., Yu Y., Liu D., Tao Z., Wu Y. Evaluation and prediction of drilling wear based on machine vision // *The International Journal of Advanced Manufacturing Technology*. 2021. Vol. 114. P. 2055–2074. <https://doi.org/10.1007/s00170-021-06887-w>.
8. Wang W., Geng Y., Wang N., Pu X., Fiaux J. O. Toolface control method for a dynamic point-the-bit rotary steerable drilling system // *Energies*. 2019. Vol. 12. Iss. 10. P. 1831. <https://doi.org/10.3390/en12101831>.
9. Li Y., Niu W., Li H., Luo Z., Wang L. Study on a new steering mechanism for point-the-bit rotary steerable system // *Advances in Mechanical Engineering*. 2014. Vol. 6. <https://doi.org/10.1155/2014/923178>.
10. Zhang C., Zou W., Cheng N. Overview of rotary steerable system and its control methods // *IEEE International Conference on Mechatronics and Automation*. 2016. P. 1559–1565. <https://doi.org/10.1109/ICMA.2016.7558796>.
11. Zhang C., Zou W., Cheng N. Overview of rotary steerable system and its control methods // *IEEE International Conference on Mechatronics and Automation*. 2016. P. 1559–1565. <https://doi.org/10.1109/ICMA.2016.7558796>.
12. Шпаро Л. Г., Юдборовский И. М. Искривление скважин под действием постоянной по величине отклоняющей силы // *Методика и техника разведки: сб. статей*. Л., 1964. Вып. 48. С. 47–51.
13. Epikhin A., Zhironkin V., Szurgacz D., Trzop K. Method for determining the loads on the deflection module of the push-the-bit rotary steerable system // *IOP Conference. Series: Earth and Environmental Science*. 2021. Vol. 684. P. 012001. <https://doi.org/10.1088/1755-1315/684/1/012001>.
14. Wang M., Li X., Wang G., Huang W., Fan Y., Luo W., et al. Prediction model of build rate of push-the-bit rotary steerable system // *Mathematical Problems in Engineering*. 2020. P. 4673759. <https://doi.org/10.1155/2020/4673759>.
15. Жабин А. Б., Поляков А. В., Аверин Е. А., Линник Ю. Н., Линник В. Ю. Оценка влияния абразивности горных пород на параметры породоразрушающих машин // *Записки Горного института*. 2019. Т. 240. С. 621–627. <https://doi.org/10.31897/pmi.2019.6.621>.
16. Шигин А. О., Шигина А. А. Прогнозируемый ресурс шарошечных долот при бурении сложноструктурных горных массивов // *Вестник Иркутского государ-*



ственного технического университета. 2014. № 1. С. 29–33.

17. Фомин О. ССК: усталостное разрушение буровых труб, его прогнозирование и профилактика // *ROGTEC. Российские нефтегазовые технологии*. 2018. [Электронный ресурс]. URL: <https://www.rogtecmagazine.com/cck-усталостное-разрушение-буровых-тр/?lang=ru> (03.03.2022).

18. Пат. № 190484, Российская Федерация, МПК E21B 10/43, E21B 7/08. Долото для бурения / В. В.

Нескоромных, П. Г. Петенёв, Д. В. Лысаков. Заявл. 06.03.2019; опубл. 02.07.2019. Бюл. № 19.

19. Пат. № 189409, Российская Федерация, МПК E21B 10/62, E21B 7/08. Алмазное долото / В. В. Нескоромных, П. Г. Петенёв, Д. В. Лысаков. Заявл. 11.03.2019; опубл. 22.05.2019. Бюл. № 15.

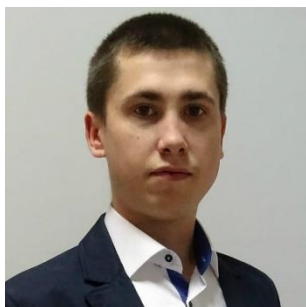
20. Пат. № 198234, Российская Федерация, МПК E21B 10/43, E21B 7/08. Алмазное буровое долото / В. В. Нескоромных, А. Е. Головченко, Д. В. Лысаков. Заявл. 06.02.2020; опубл. 25.06.2020. Бюл. № 18.

References

1. Ahmed A., Islam M. A., Alam M. Z., Quazi H. S. Surface settlement induced by horizontal directional drilling. *Underground Space*. 2023;8:94-108. <https://doi.org/10.1016/j.undsp.2022.05.001>.
2. Huang W., Wang G., Gao D. A method for predicting the build-up rate of 'push-the-bit' rotary steering system. *Natural Gas Industry B*. 2021;8(6):622-627. <https://doi.org/10.1016/j.ngib.2021.11.010>.
3. Yantao B., Gonghui L., Ghua D., Jun L. Finite element analysis of effect of flexible pupjoints on push-the-bit rotary steering deflecting force. *Chemistry and Technology of Fuels and Oils*. 2020;56:218-225. <https://doi.org/10.1007/s10553-020-01132-8>.
4. Gu P., Zhu C., Yu Y., Liu D., Tao Z., Wu Y. Evaluation and prediction of drilling wear based on machine vision. *The International Journal of Advanced Manufacturing Technology*. 2021;114(11):2055-2074. <https://doi.org/10.1007/s00170-021-06887-w>.
5. Che D., Zhu W.-L., Ehmann K. F. Chipping and crushing mechanisms in orthogonal rock cutting. *International Journal of Mechanical Sciences*. 2016;119:224-236. <https://doi.org/10.1016/j.ijmecsci.2016.10.020>.
6. Wang X., Wang Z., Wang D., Chai L. A novel method for measuring and analyzing the interaction between drill bit and rock. *Measurement*. 2018;121:344-354. <https://doi.org/10.1016/j.measurement.2018.02.045>.
7. Gu P., Zhu C., Yu Y., Liu D., Tao Z., Wu Y. Evaluation and prediction of drilling wear based on machine vision. *The International Journal of Advanced Manufacturing Technology*. 2021;114:2055-2074. <https://doi.org/10.1007/s00170-021-06887-w>.
8. Wang W., Geng Y., Wang N., Pu X., Fiaux J. O. Toolface control method for a dynamic point-the-bit rotary steerable drilling system. *Energies*. 2019;12(10):1831. <https://doi.org/10.3390/en12101831>.
9. Li Y., Niu W., Li H., Luo Z., Wang L. Study on a new steering mechanism for point-the-bit rotary steerable system. *Advances in Mechanical Engineering*. 2014;6. <https://doi.org/10.1155/2014/923178>.
10. Zhang C., Zou W., Cheng N. Overview of rotary steerable system and its control methods. *IEEE International Conference on Mechatronics and Automation*. 2016:1559-1565. <https://doi.org/10.1109/ICMA.2016.7558796>.
11. Zhang C., Zou W., Cheng N. Overview of rotary steerable system and its control methods. *IEEE International Conference on Mechatronics and Automation*. 2016:1559-1565. <https://doi.org/10.1109/ICMA.2016.7558796>.
12. Shrago L. G., Well deviation under the action of a constant deflecting force. In: *Metodika i tekhnika razvedki = Exploration Methodology and Technique*. Leningrad; 1964, iss, 48, p. 47–51. (In Russ.).
13. Epikhin A., Zhironkin V., Szurgacz D., Trzop K. Method for determining the loads on the deflection module of the push-the-bit rotary steerable system. *IOP Conference. Series: Earth and Environmental Science*. 2021;684:012001. <https://doi.org/10.1088/1755-1315/684/1/012001>.
14. Wang M., Li X., Wang G., Huang W., Fan Y., Luo W., et al. Prediction model of build rate of push-the-bit rotary steerable system. *Mathematical Problems in Engineering*. 2020:4673759. <https://doi.org/10.1155/2020/4673759>.
15. Zhabin A. B., Polyakov A. V., Averin E. A., Linnik Y. N., Linnik V. Y. Estimation of abrasiveness impact on the parameters of rock-cutting equipment. *Zapiski Gornogo Instituta = Journal of Mining Institute*. 2019;240:621-627. (In Russ.). <https://doi.org/10.31897/pmi.2019.6.621>.
16. Shigin A. O., Shigina A. A. Roller cone bit life expectancy when drilling complex structure rock massifs. *Vestnik Irkutskogo gosudarstvennogo tekhnicheskogo universiteta = Proceedings of Irkutsk State Technical University*. 2014;1:29-33. (In Russ.).
17. Fomin O. Siberian Service Company: Fatigue failure of drill pipes, its prediction and prevention. *ROGTEC. Rossiiskie neftegazovye tekhnologii = ROGTEC. Russian Oil and Gas Technologies*. 2018. Available from: <https://www.rogtecmagazine.com/cck-усталостное-разрушение-буровых-тр/?lang=ru> [Accessed 3rd March 2022]. (In Russ.).
18. Neskoromnykh V. V., Petenev P. G., Lysakov D. V. *Bore bit*. Patent RF, no. 190484; 2019. (In Russ.).
19. Neskoromnykh V. V., Petenev P. G., Lysakov D. V. *Diamond bit*. Patent RF, no. 189409; 2019. (In Russ.).
20. Neskoromnykh V. V., Golovchenko A. E., Lysakov D. V. *Diamond drill bit*. Patent RF, no. 198234; 2020. (In Russ.).



Информация об авторе / Information about the author



Лысаков Дмитрий Викторович,
аспирант,
ведущий инженер кафедры технологии и техники разведки,
Институт горного дела, геологии и геотехнологий,
Сибирский федеральный университет,
г. Красноярск, Россия,
lysackovd@yandex.ru,
<https://orcid.org/0000-0002-9011-5906>.
Dmitry V. Lysakov,
Postgraduate Student,
Leading Engineer of the Department of Exploration Technology and Technique,
Institute of Mining, Geology and Geotechnologies,
Siberian Federal University,
Krasnoyarsk, Russia,
lysackovd@yandex.ru,
<https://orcid.org/0000-0002-9011-5906>.

Вклад автора / Contribution of the author

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

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

Конфликт интересов / Conflict of interests

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

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

Информация о статье / Information about the article

Статья поступила в редакцию 17.03.2022; одобрена после рецензирования 06.10.2022; принята к публикации 11.11.2022.

The article was submitted 17.03.2022; approved after reviewing 06.10.2022; accepted for publication 11.11.2022.



ОБОГАЩЕНИЕ ПОЛЕЗНЫХ ИСКОПАЕМЫХ

Научная статья

УДК 552.574

<https://doi.org/10.21285/2686-9993-2022-45-4-436-445>Обогащение шламов угольных гидроотвалов
методом винтовой сепарацииНина Юрьевна Турецкая^a, Татьяна Александровна Чикишева^b^{a,b}Институт земной коры СО РАН, г. Иркутск, Россия^{a,b}ООО «Научно-производственная компания «Спирит»», г. Иркутск, Россия^bИркутский государственный университет, г. Иркутск, РоссияАвтор, ответственный за переписку: Турецкая Нина Юрьевна, tny@spirit-irk.ru

Резюме. Целью представленного исследования стало изучение возможности получения дополнительного угольного продукта и железосодержащего концентрата из шламов угольного гидроотвала. В ходе проведения исследования был изучен вещественный состав исходных шламов и проведены технологические испытания. Изучение вещественного состава было выполнено при помощи химического, гранулометрического, минералогического анализов, технологические испытания проведены по гравитационно-магнитной схеме обогащения. В качестве основного обогатительного оборудования использован винтовой сепаратор. Доводочная операция выполнена методом мокрой магнитной сепарации. В результате изучения вещественного состава было установлено, что исходные шламы гидроотвала представлены углями: на 44,7 % каменным углем и на 43,32 % бурым. Основная масса каменного угля распределяется в диапазоне крупности -2+0,25 мм и составляет 51,15 %, бурого угля – в диапазоне крупности -2+0,25 мм в количестве 13,32 %. В основной своей массе материал представлен крупностью менее 0,25 мм с повышенным содержанием зольности в нем. В ходе проведения технологических испытаний получен угольный концентрат с зольностью 14,4 %. Данный продукт соответствует марке ДШ (длиннопламенный штыб). Железосодержащий концентрат с массовой долей железа 64,7 % является пригодным для применения в металлургической промышленности или может быть использован в тяжелосредней сепарации для обогащения угля. Проведенное исследование иллюстрирует возможность получения качественного вторичного сырья без дополнительных затрат на добычу по экологически чистой технологии.

Ключевые слова: обогащение шламового гидроотвала, винтовая сепарация, экологически чистая технология, угольные шламы, минералогия угольных шламов, получение вторичного сырья, угольная промышленность

Финансирование: Работы выполнены в рамках комплексного научно-технического проекта Министерства науки и высшего образования Российской Федерации № 075-15-2022-1192 «Переработка хвостов угольных обогатительных фабрик с целью получения товарного угольного концентрата» при поддержке комплексной научно-технической программы полного инновационного цикла «Разработка и внедрение комплекса технологий в областях разведки и добычи твердых полезных ископаемых, обеспечения промышленной безопасности, биоремедиации, создания новых продуктов глубокой переработки угольного сырья при последовательном снижении экологической нагрузки на окружающую среду и рисков для жизни населения», утвержденной Распоряжением Правительства Российской Федерации № 1144-р от 11 мая 2022 г.

Для цитирования: Турецкая Н. Ю., Чикишева Т. А. Обогащение шламов угольных гидроотвалов методом винтовой сепарации // Науки о Земле и недропользование. 2022. Т. 45. № 4. С. 436–445. <https://doi.org/10.21285/2686-9993-2022-45-4-436-445>.

MINERAL PROCESSING

Original article

Enrichment of sludge dump coal by spiral separation

Nina Yu. Turetskaya^a, Tatiana A. Chikisheva^b^{a,b}Institute of the Earth's Crust SB RAS, Irkutsk, Russia^{a,b}Research and Production Company Spirit, LLC, Irkutsk, Russia^bIrkutsk State University, Irkutsk, RussiaCorresponding author: Nina Yu. Turetskaya, tny@spirit-irk.ru

© Турецкая Н. Ю., Чикишева Т. А., 2022



Abstract. The purpose of the presented research is to study the possibility of obtaining an additional coal product and iron-containing concentrate from the sludge of a coal hydraulic dump. The research involved the study of the material composition of the initial sludge and technological tests. Material composition was examined using chemical, granulometric and mineralogical analyzes, the technological tests were conducted according to the gravitational-magnetic enrichment scheme. A spiral separator was used as the main enrichment equipment. Finishing operation was performed by the method of wet magnetic separation. Having studied the material composition, we determined that the initial sludge of the hydraulic dump is represented by 44.7 % of black coal and 43.32 % of brown coal. The bulk of hard coal is distributed in the size range of $-2+0.25$ mm and makes 51.15 %, brown coal is distributed in the size range of $-2+0.25$ mm in the amount of 13.32 %. The material is predominantly represented by a particle size of less than 0.25 mm with a high ash content in it. A coal concentrate with the ash content of 14.4 % was obtained as a result of technological tests. This product corresponds to the brand LFF (long-flaming fine). An iron-containing concentrate with the iron mass fraction of 64.7 % can be used in the metallurgical industry or in heavy-medium separation for coal enrichment. The study illustrates the possibility of obtaining high-quality secondary raw materials without additional mining costs using environmentally friendly technology.

Keywords: enrichment of sludge dump coal, spiral separation, environmentally friendly technology, coal sludge, coal sludge mineralogy, recovery of secondary raw materials, coal industry

Funding: The study was performed in the frameworks of the integrated scientific and technical program of the Ministry of Science and Higher Education of the Russian Federation No. 075-15-2022-1192 "Processing of tailings of coal preparation plants to obtain commercial coal concentrate". The research was also supported by a comprehensive scientific and technical program of the full innovation cycle "Development and implementation of a set of technologies in the field of exploration and production of solid minerals, ensuring industrial safety, bio-remediation, creation of new products of coal raw material deep processing with a consistent reduction in the environmental load and risks to the population life" approved by the Decree of the Government of the Russian Federation No. 1144-p of May 11, 2022.

For citation: Turetskaya N. Yu., Chikisheva T. A. Enrichment of sludge dump coal by spiral separation. *Nauki o Zemle i nedropol'zovanie = Earth sciences and subsoil use*. 2022;45(4):436-445. (In Russ.). <https://doi.org/10.21285/2686-9993-2022-45-4-436-445>.

Введение

На сегодняшний день весьма актуальным вопросом для угледобывающей промышленности является переработка гидроотвалов углеобогащительных фабрик [1–4], которые относятся к I группе техногенных месторождений углесодержащего сырья. Объемы гидроотвалов составляют сотни миллионов тонн¹. Часть из них уже переполнена, и это влечет за собой необходимость создания новых отвалов, выведения земельных участков из хозяйственного оборота, а вместе с этим значительные финансовые затраты [5]. Также в процессе обогащения угля в гидроотвалы попадает материал, содержащий уголь, а это является технологической потерей для угледобывающих фабрик. В настоящее время потребность в получении дополнительной товарной продукции, а именно угольного концентрата с содержанием зольности не более 25 %, возросла [6]. Вовлечение в переработку шламов из гидроотвала поможет решить про-

блему ресурсосбережения, охраны недр, рационального использования недр и защиты окружающей среды² [7–9]. Существующие методы переработки шламов гидроотвалов основываются на флотационном обогащении³ [10–14]. Данный метод является энергозатратным, требует повышенного потребления необходимых реагентов и при этом оказывает негативное влияние на окружающую среду. В связи с этим для уменьшения объемов гидроотвалов с целью продления их эксплуатационного срока и снижения экологической нагрузки на окружающую среду для получения дополнительного товарного продукта необходимы специальные технологии, заключающие в себе экологически чистые способы обогащения техногенного сырья [15–20].

Материалы и методы исследования

Целью представленного исследования стало получение дополнительного угольного

¹ Государственный доклад «О состоянии и использовании минерально-сырьевых ресурсов Российской Федерации в 2020 году» от 22 декабря 2022 г. [Электронный ресурс]. URL: https://www.mnr.gov.ru/docs/gosudarstvennye_doklady/gosudarstvennyy_doklad_o_sostoyanii_i_ispolzovanii_mineralno_syrevykh_resursov_2020/ (12.09.2022).

² Левкин Н. Д. Оценка геоэкологической ситуации и способы снижения деструкции окружающей среды в угледобывающих промышленных регионах: дис. ... д-ра. техн. наук: 25.00.36. Тула, 2011. 234 с.

³ Новак В. И. Обоснование и разработка рациональной технологии флюкляционного разделения тонкодисперстных угольных шламов: дис. ... канд. техн. наук: 25.00.13. М., 2011. 158 с.



продукта и железосодержащего концентрата из шлама угольного гидроотвала. Лабораторные работы выполнялись на шламах гидроотвала одной из углеобогатительных фабрик Сибирского федерального округа Российской Федерации. Вещественный состав изучался при помощи гранулометрического, химического и минералогического анализов. Определение химического состава проводилось атомно-эмиссионным методом с индуктивно-связанной плазмой (Аналитический центр Иркутского научно-исследовательского института благородных и редких металлов и алмазов), а также методом спектрофотометрии при помощи комплекса GENESYS 10 S Thermo Fisher Scientific (Институт земной коры Сибирского отделения Российской Академии наук). Определение зольности топлива выполнялось методом ускоренного озоления (Лаборатория аналитического контроля ООО «Инженерный центр «Иркутскэнерго»»). Минеральный состав пробы шламов гидроотвала и количественная оценка содержаний каждого минерала в пробе определялись с помощью методов оптико-минералогического анализа с применением бинокулярного стереоскопического микроскопа МИКРОМЕД МС-2-ZOOM. Прозрачные минералы легкой фракции и тонких классов исследовались в иммерсионных препаратах с применением поляризационного микроскопа МИН-8. Минеральный состав (породной части) класса крупности менее 0,04 мм определялся методами рентгенофазового анализа на аппарате ДРОН-3.0.

Результаты исследования и их обсуждение

В результате изучения вещественного состава было установлено, что в химический состав исходных шламов угольного гидроотвала входят диоксид кремния с содержанием 26,01 %, железо общее – 2,38 %, оксид алюминия – 10,03 %, оксид титана – 0,19 %, оксид марганца – 1,55 %, оксид магния – 0,97 %, оксид натрия – 0,11 %, барий – 0,045 %. Содержания вредных примесей, таких как сера, мышьяк, фосфор, составляют 0,95, 0,0011 и 0,01 % соответственно.

Гранулометрический анализ был выполнен согласно общепринятым рекомендациям⁴, результаты данного анализа приведены в табл. 1. Установлено, что основная масса материала (61,1 %) представлена фракцией менее 0,25 мм. Зольность данной крупности составляет 63,03 %. Выход материала более 2 мм составил 9,4 %, зольность – 28,49 %. На материал от 2 до 0,25 мм приходится 29,5 %. Зольность составляет 23,91 %.

Поскольку в шламах практический интерес представляет не только уголь, но и железо, его распределение также было изучено, результаты представлены в табл. 2. Данные показали, что распределение железа по классам крупности неравномерно, в основной своей массе железо распределяется в материале менее 71 мкм. Массовая доля железа колеблется от 0,45 до 4,34 % при средневзвешенном содержании в исходных шламах 2,7 %.

При проведении минералогического анализа методом визуального просмотра материала более 2 мм установлено, что он представлен в основной массе каменным углем и обломками песчаников и алевролитов с мало-мощными прослоями угля. Бурый уголь в данном диапазоне крупности визуализируется в единичных зернах. Угли в крупных классах часто содержат включения и прослои терригенного материала.

Материал менее 2 мм представлен углями: на 44,7 % каменным углем и на 43,32 % бурым. Породообразующие минералы представлены кварцем, плагиоклазом, карбонатами и слюдами, в сумме составляющими 8,07 % от всей массы пробы. Также в пробе присутствуют магнетит (0,79 %), пирит (0,42 %) и халькопирит (0,21 %). Минеральный состав исследуемой пробы представлен в табл. 3.

Установлено, что основная масса каменного и бурого угля сосредоточена в материале пробы менее 2 мм. Распределение каменного угля находится в диапазоне крупности -2+0,25 мм и составляет 51,15 %. Распределение бурого угля – в диапазоне крупности -2+0,25 мм в количестве 13,32 %. На рис. 1–3 представлены микрофотографии материала легкой фракции по классам крупности.

⁴ Митрофанов С. И., Барский Л. А., Самыгин В. Д. Исследование полезных ископаемых на обогатимость. М.: Мир, 1974. 440 с.



Таблица 1. Гранулометрическая характеристика исходных шламов угольного гидроотвала и определение зольности по классам крупности

Table 1. Granulometric characteristics of the initial coal sludge from the dump and determination of the ash content by size classes

Класс крупности, мм	Выход, %	Зольность сухого топлива, %	Распределение, %	Класс крупности, мм	Зольность сухого топлива, %
+15	1,3	70	1,88	+2	28,49
-15+10	0,8	49,1	0,81		
-10+8	0,6	30,8	0,38		
-8+7	0,2	31,1	0,13		
-7+5	1	20,6	0,43		
-5+4	0,6	16,9	0,21		
-4+3,2	0,5	14,5	0,15		
-3,2+2	4,4	17	1,55		
-2+1	7,5	18,4	2,86	-2+0,25	23,91
-1+0,5	9,9	23,6	4,84		
-0,5+0,25	12,1	27,6	6,92		
-0,25+0,125	9,4	35,8	6,98	-0,25+0	63,03
-0,125+0,071	5,3	43,7	4,8		
-0,071+0,04	16,1	62,2	20,76		
-0,04+0	30,3	74,3	47,29		
Итого	100	48,25	100	Итого	46,46

Таблица 2. Распределение железа по классам крупности

Table 2. Iron distribution by size classes

Класс крупности, мм	Выход, %	Массовая доля железа, %	Распределение, %
-2+1	16,9	0,89	6
-1+0,5	9,9	0,45	1,77
-0,5+0,25	12,1	0,49	2,37
-0,25+0,125	9,4	1,86	6,99
-0,125+0,071	5,3	3	6,36
-0,071+0,04	16,1	4,34	27,96
-0,04+0	30,3	4,01	48,55
Итого исх.	100	2,7	100

Таблица 3. Минеральный состав исходной пробы

Table 3. Mineral composition of the initial sample

Минерал	Содержание, %
Магнетит	0,79
Пирит	0,42
Халькопирит	0,21
Уголь каменный	44,7
Уголь бурый	43,32
Кварц	4,08
Плагиоклаз	2,95
Карбонаты	1,04
Мусковит	Единичные зерна
Биотит	
Циркон	
Обломки песчаников и алевролитов	
Итого	100

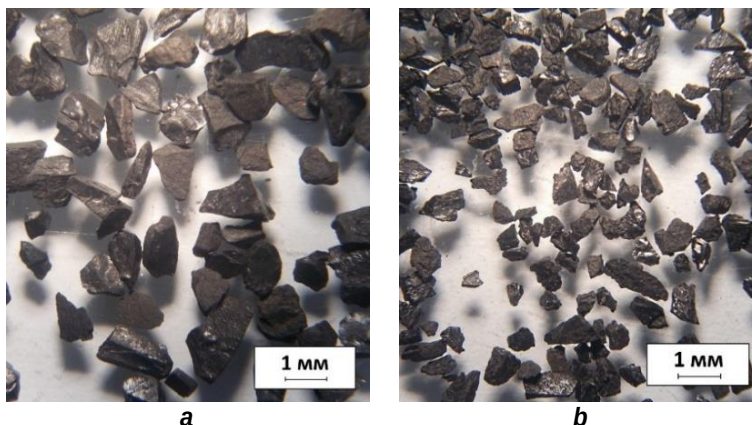


Рис. 1. Материал легкой фракции класса крупности -2+1 мм (a) и -1+0,5 мм (b)
Fig. 1. Light fraction material of the size classes of -2+1 mm (a) and -1+0.5 mm (b)

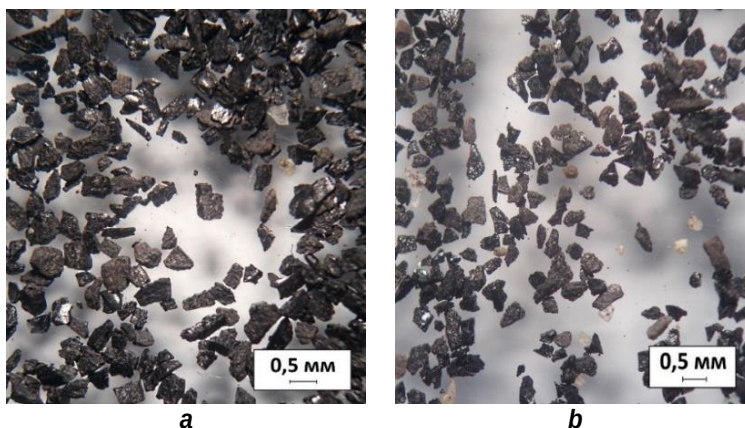


Рис. 2. Материал легкой фракции класса крупности -0,5+0,25 мм (a) и -0,25+0,125 мм (b)
Fig. 2. Light fraction material by the size classes of -0.5+0.25 mm (a) and -0.25+0.125 mm (b)

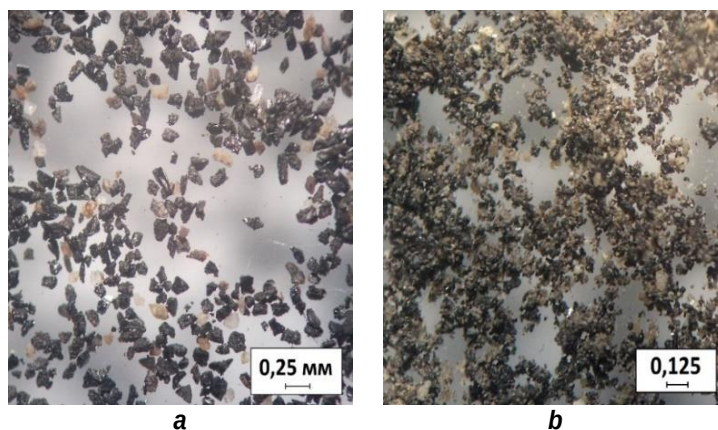


Рис. 3. Материал легкой фракции класса крупности -0,125+0,071 мм (a) и -0,071+0 мм (b)
Fig. 3. Light fraction material by the size classes of -0.125+0.071 mm (a) and -0.071+0 mm (b)

Данные, полученные при изучении вещественного состава исходного шлама угольного гидроотвала, позволили определить основные положения технологии подготовки пробы к обогащению [11] и уточнить продуктивный класс крупности для дальнейших технологических исследований. Для шламов, предоставленных на исследования, продук-

тивной частью явилась крупность от 2 до 0,25 мм.

Пробоподготовка к технологическим испытаниям заключала в себе операции дезинтеграции и сгущения. В качестве основного обогащательного оборудования был выбран минеральный винтовой сепаратор. Минеральный винтовой сепаратор имеет профиль се-



чения желоба близкий к части эллипса и применяется для обогащения более крупного материала (до 2 мм). Он обладает наиболее высокой производительностью, способен выводить в концентрат зерна ценных минералов размером до 70 мкм. Доводочная операция на концентрате винтовой сепарации осуществлялась мокрой магнитной сепарацией. Схема обогащения шламов угольного гидроотвала представлена на рис. 4.

В результате технологического испытания были получены:

- угольный концентрат с выходом 25,5 %; зольность продукта составила 14,4 %;
- железосодержащий концентрат с массовой долей железа 64,72 %; выход продукта составил 0,7 %.

Полученный угольный концентрат (рис. 5, а) соответствует ТУ 12.36.225-91 «Угли ОАО «Востсибуголь» для сжигания на электростанциях», по которым обогащенные угли, получаемые на фабрике, должны иметь значение данного показателя не более 26,5 % и относиться к марке ДШ (длиннопламенный штыб).

Железосодержащий концентрат (рис. 5, б) является пригодным для применения в металлургической промышленности или может быть использован в тяжелосредней сепарации для обогащения угля.

В результате лабораторных исследований была подтверждена возможность получения угольного продукта и железосодержащего концентрата из шламов угольного гидроотвала, соответствующих всем требованиям.

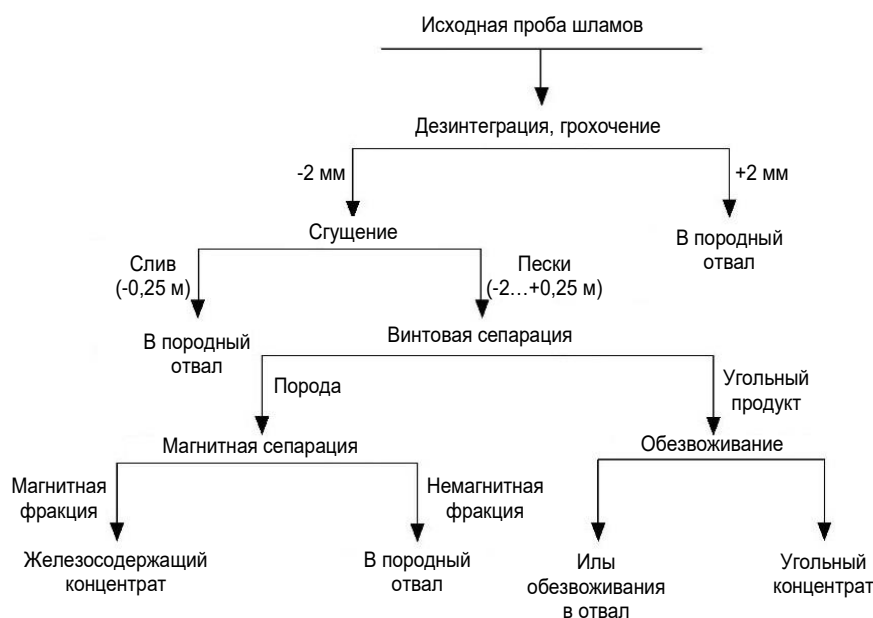


Рис. 4. Схема обогащения шламов угольного гидроотвала
Fig. 4. Diagram of sludge dump coal enrichment



Рис. 5. Продукты обогащения шламов угольного гидроотвала:
а – угольный продукт; б – железосодержащий концентрат
Fig. 5. Products of sludge dump coal enrichment:
а – coal product; б – iron-containing concentrate



Заключение

Таким образом, настоящее исследование иллюстрирует возможность получения качественного вторичного топлива без дополнительных затрат на добычу по экологически чистой технологии при низких энергозатратах с применением в качестве основного обогащающего оборудования винтовых сепараторов. В работе подтверждается перспективность реализации проекта по вовлечению в переработку шламов угольных гидроотвалов. Переработка шламов позволит решить несколько актуальных вопросов, а именно воз-

можность получения качественного вторичного топлива с минимальными затратами на добычу по экологически чистой технологии при низких энергозатратах. Также вовлечение в переработку илов гидроотвала решает проблему ресурсосбережения, охраны недр, рационального использования сырья и защиты окружающей среды. Кроме того, получаемый попутно железосодержащий концентрат может быть возвращен в обратный процесс обогащения углей. Все это успешно решает вопрос комплексности использования гидроотвалов углеобогащающих фабрик.

Список источников

1. Хамзина Т. Угольный шлам: вторая жизнь // Глобус. 2021. № 1. [Электронный ресурс]. URL: <https://www.vnedra.ru/tehnologii/ugolnyj-shlam-vtoraya-zhizn-13710/> (12.09.2022).
2. Шадрюнова И. В., Зелинская Е. В., Волкова Н. А., Орехова Н. Н. Горнопромышленные отходы: ресурсный потенциал и технологии переработки (на примере Сибири и Урала) // Современные проблемы комплексной переработки труднообогатимых руд и техногенного сырья (Плаксинские чтения – 2017): материалы Междунар. науч. конф. (г. Красноярск, 12–15 сентября 2017 г.). Красноярск: Изд-во СФУ, 2017. С. 15–21.
3. Качурин Н. М., Ефимов В. И., Мосина Е. К., Факторович В. В. Перспективы экологически безопасного использования отходов производства на территориях горнодобывающих регионов // Безопасность труда в промышленности. 2014. № 9. С. 81–84.
4. Таразанов И. Итоги работы угольной промышленности России за 2012 год // Уголь. 2013. № 3. С. 78–90.
5. Качурин Н. М. Методические положения экологического мониторинга параметров окружающей среды при добыче полезных ископаемых // Проблемы безопасности и эффективности освоения георесурсов в современных условиях. Пермь: Изд-во Горного института УрО РАН, 2014. С. 128–133.
6. Гришин И. А., Князбаев Ж. С. К проблеме выбора метода обогащения для углей различной стадии метаморфизма // Успехи современного естествознания. 2016. № 1. С. 107–110.
7. Качурин Н. М., Воробьев С. А., Чистяков Я. В., Рыбак Л. Л. Экологические последствия закрытия угольных шахт Кузбасса по газодинамическому фактору и опасности эндогенных пожаров на отвалах // Экология и промышленность России. 2015. Т. 19. № 4. С. 54–58.
8. Дамба А., Станис Е. В. Использование комплексной геоэкологической оценки в экологическом аудите при разработке угольных месторождений Монголии // Вестник Российского университета дружбы народов. Серия: Экология и безопасность жизнедеятельности. 2015. № 2. С. 100–106.
9. Киреев С. А. Современное состояние и экологическая оценка влияния породных отвалов предприятий угольной промышленности // Известия Тульского государственного университета. Науки о Земле. 2022. № 1. С. 62–71. <https://doi.org/10.46689/2218-5194-2022-1-1-62-71>.
10. Новак В. И., Козлов В. А. Обзор современных способов обогащения угольных шламов // Горный информационно-аналитический бюллетень (научно-технический журнал). 2012. Отдельный выпуск № 5. Угледобыча: технологии, безопасность, переработка и обогащение. С. 130–138.
11. Козлов В. А., Новак В. И. Оптимизация работы углеобогащающей фабрики с целью получения максимального выхода концентрата // Горный информационно-аналитический бюллетень (научно-технический журнал). 2019. № 4. С. 175–186. <https://doi.org/10.25018/0236-1493-2019-04-0-175-186>.
12. Сипотенко А. И., Коткин А. М., Перемежко Э. А. Совершенствование техники и технологии обработки шламов для сокращения их выпуска как отдельного товарного продукта. М.: ЦНИЭИ Уголь, 1991. 56 с.
13. Козлов В. А., Новак В. И. Применение колонной флотации в угольной промышленности // Горный информационно-аналитический бюллетень (научно-технический журнал). 2011. № 4. С. 277–283.
14. Белоусов В. А. Основные направления интенсификации флотационного обогащения углей // Международный журнал прикладных и фундаментальных исследований. 2014. № 11-5. С. 719–721.
15. Козлов В. А., Козлов Е. В. Выбор наиболее рациональных методов оценки обогатимости углей для практического применения при проектировании обогащающих фабрик // Горный информационно-аналитический бюллетень (научно-технический журнал). 2012. № 4. С. 150–155.
16. Белоусов В. А. Перспективные методы обогащения угольных шламов // Международный журнал прикладных и фундаментальных исследований. 2014. № 4. С. 15–17.
17. Гришин И. А., Князбаев Ж. С. К проблеме выбора метода обогащения для углей различной стадии



метаморфизма // Успехи современного естествознания. 2016. № 1. С. 107–110.

18. Сосновский С. А., Сачков В. И. Комплексная переработка техногенного углесодержащего сырья // Проблемы комплексной и экологически безопасной переработки природного и техногенного минерального сырья (Плаксинские чтения – 2021): материалы Междунар. науч. конф. (г. Владикавказ, 4–8 ноября 2021 г.). Владикавказ: Изд-во СКГМИ (ГТУ), 2021. С. 498–501.

19. Прокопьев С. А., Пономарева А. М., Болотин М. Л. Переработка техногенного сырья углеобогати-

тельной фабрики // Экологические проблемы и новые технологии комплексной переработки минерального сырья (Плаксинские чтения – 2002): материалы Междунар. совещ. (г. Чита, 16–19 сентября 2002 г.). Чита: ПКЦ-Альтекс, 2002. С. 79–82.

20. Бобриков В. В., Калабухов М. Л., Канев Н. И. Исследования и совершенствование процессов классификации и обогащения угольного шлама на Печеровской ЦОФ // III Конгресс обогатителей стран СНГ (г. Москва, 19–22 марта 2001 г.). М.: Изд-во МИСиС, 2001. С. 69–75.

References

1. Khamzina T. Second life of coal sludge. *Globus*. 2021;1. Available from: <https://www.vnedra.ru/tehnologii/ugolnyj-shlam-vtoraya-zhizn-13710/> [Accessed 12th September 2022]. (In Russ.).

2. Shadrinova I. V., Zelinskaya E. V., Volkova N. A., Orekhova N. N. Mining waste: resource potential and processing technologies (on the example of Siberia and the Urals). In: *Sovremennye problemy kompleksnoi pererabotki trudnoobogatimyykh rud i tekhnogennogo syr'ya* (Plaksinskie chteniya – 2017): materialy Mezhdunar. nauch. konf. = *Modern problems of complex processing of refractory ores and technogenic raw materials* (Plaksinsky readings – 2017): materials of the International scientific conference. 12–15 September 2017, Krasnoyarsk. Krasnoyarsk: Siberian Federal University; 2017, p. 15–21. (In Russ.).

3. Kachurin N. M., Efimov V. I., Mosina E. K., Faktorovich V. V. Prospects for production waste environmentally safe use in mining regions. *Bezopasnost' truda v promyshlennosti* = *Journal of Research and Production*. 2014;9:81-84. (In Russ.).

4. Tarazanov I. Russian coal industry performance in 2012. *Ugol* = *Russian Coal Journal*. 2013;3:78-90. (In Russ.).

5. Kachurin N. M. Methodological provisions of environmental parameters monitoring when mining. In: *Problemy bezopasnosti i effektivnosti osvoeniya georesursov v sovremennykh usloviyakh* = *Problems of safety and efficiency of georesources development in modern conditions*. Perm: Mining Institute UB RAS; 2014, p. 128–133. (In Russ.).

6. Grishin I. A., Knyazbaev Z. S. To the enrichment method choice problem for coals of various stage of the metamorphism. *Uspekhi sovremennogo estestvoznaniya*. 2016;1:107-110. (In Russ.).

7. Kachurin N. M., Vorob'ev S. A., Chistyakov Ya. V., Rybak L. L. Environmental consequences of coal mines of Kuznetsk basin by the gasdynamic factor and hazard of endogenous fires at dumps. *Ekologiya i promyshlennost' Rossii* = *Ecology and Industry of Russia*. 2015;19(4):54-58. (In Russ.).

8. Damba A., Stanis E. V. The use of an integrated geo-ecological assessment in environmental audit at the open coal mining in Mongolia. *Vestnik Rossiiskogo universiteta druzhby narodov. Seriya: Ekologiya i bezopasnost' zhiznedeyatel'nosti* = *RUDN Journal of Ecology and Life*

Safety. 2015;2:100-106. (In Russ.).

9. Kireev S. A. The current state and environmental assessment of the impact of rock dumps of coal industry enterprises. *Izvestiya Tul'skogo gosudarstvennogo universiteta. Nauki o Zemle*. 2022;1:62-71. (In Russ.). <https://doi.org/10.46689/2218-5194-2022-1-1-62-71>.

10. Novak V. I., Kozlov V. A. Review of modern enrichment methods of coal sludge. *Gornyi informatsionno-analiticheskii byulleten' (nauchno-tekhnicheskii zhurnal)* = *Mining informational and analytical bulletin (scientific and technical journal)*. 2012;5:130-138. (In Russ.).

11. Kozlov V. A., Novak V. I. Optimizing coal preparation plant performance towards maximum concentrate yield. *Gornyi informatsionno-analiticheskii byulleten' (nauchno-tekhnicheskii zhurnal)* = *Mining informational and analytical bulletin (scientific and technical journal)*. 2019;4:175-186. (In Russ.). <https://doi.org/10.25018/0236-1493-2019-04-0-175-186>.

12. Sipotenko A. I., Kotkin A. M., Peremezhko E. A. Improving the technique and technology of sludge treatment to reduce their output as a separate commercial product. Moscow: TsNIEI Ugol'; 1991. 56 p. (In Russ.).

13. Kozlov V. A., Novak V. I. Application of flotation column in the coal industry. *Gornyi informatsionno-analiticheskii byulleten' (nauchno-tekhnicheskii zhurnal)* = *Mining informational and analytical bulletin (scientific and technical journal)*. 2011;4:277-283. (In Russ.).

14. Belousov V. A. Main directions of coal flotation enrichment intensification. *Mezhdunarodnyi zhurnal prikladnykh i fundamental'nykh issledovaniy*. 2014;11-5:719-721. (In Russ.).

15. Kozlov V. A., Kozlov E. V. Selection of the most rational evaluation methods of coal washability to be applied when designing concentration plants. *Gornyi informatsionno-analiticheskii byulleten' (nauchno-tekhnicheskii zhurnal)* = *Mining informational and analytical bulletin (scientific and technical journal)*. 2012;4:150-155. (In Russ.).

16. Belousov V. A. Promising methods of coal sludge enrichment. *Mezhdunarodnyi zhurnal prikladnykh i fundamental'nykh issledovaniy*. 2014;4:15-17. (In Russ.).

17. Grishin I. A., Knyazbaev Z. S. To the enrichment method choice problem for coals of various stage of the metamorphism. *Uspekhi sovremennogo estestvoznaniya* = *Advances in current natural sciences*. 2016;1:107-110. (In Russ.).

18. Sosnovskii S. A., Sachkov V. I. Complex processing



of technogenic coal-containing raw materials. In: *Problemy kompleksnoi i ekologicheskoi bezopasnoi pererabotki prirodnogo i tekhnogennogo mineral'nogo syr'ya* (Plaksinskie chteniya – 2021): materialy Mezhdunar. nauch. konf. = *Problems of complex and environmentally safe processing of natural and technogenic mineral raw materials* (Plaksinsky readings – 2021): materials of the International scientific conference. 4–8 November 2021, Vladikavkaz. Vladikavkaz: North Caucasian Institute of Mining and Metallurgy (State Technological University); 2021, p. 498–501. (In Russ.).

19. Prokop'ev S. A., Ponomareva A. M., Bolotin M. L. Processing of technogenic raw materials of a coal washing plant. In: *Ekologicheskie problemy i novye tekhnologii kom-*

pleksnoi pererabotki mineral'nogo syr'ya (Plaksinskie chteniya – 2002): materialy Mezhdunar. soveshch. = *Environmental problems and new technologies for the complex processing of mineral raw materials* (Plaksinsky readings – 2002): materials of the International meeting. 16–19 September 2002, Chita. Chita: PKTs-Al'teks; 2002, p. 79–82. (In Russ.).

20. Bobrikov V. V., Kalabukhov M. L., Kanev N. I. Research and improvement of coal sludge classification and enrichment at the Pecherovskaya Central Preparation Plant. In: *III Kongress obo-gatitelei stran SNG = 3^d CIS Congress of the Mineral Processing Engineers*. 19–22 March 2001, Moscow. Moscow: National University of Science and Technology (MISIS); 2001, p. 69–75. (In Russ.).

Информация об авторах / Information about the authors



Турецкая Нина Юрьевна,

ведущий инженер отдела комплексного использования минерального сырья,
Институт земной коры СО РАН,
г. Иркутск, Россия,
руководитель группы обогащения черных металлов,
ООО «Научно-производственная компания «Спирит»»,
г. Иркутск, Россия,
tny@spirit-irk.ru.

Nina Yu. Turetskaya,

Leading Engineer of the Department of Complex Use of Mineral Raw Materials,
Institute of the Earth's Crust SB RAS,
Irkutsk, Russia,
Head of the Ferrous Metal Benefication Group,
Research and Production Company Spirit, LLC,
Irkutsk, Russia,
tny@spirit-irk.ru.



Чикишева Татьяна Александровна

кандидат геолого-минералогических наук,
младший научный сотрудник отдела
комплексного использования минерального сырья,
Институт земной коры СО РАН,
г. Иркутск, Россия,
заведующая минералогической лабораторией,
ООО «Научно-производственная компания «Спирит»»,
г. Иркутск, Россия,
доцент кафедры полезных ископаемых,
Иркутский государственный университет,
г. Иркутск, Россия,
cta@spirit-irk.ru.

Tatiana A. Chikisheva,

Cand. Sci. (Geol. & Mineral.),
Junior Researcher of the Department of Complex Use of Mineral Raw Materials,
Institute of the Earth's Crust SB RAS,
Irkutsk, Russia,
Head of the Mineralogical Laboratory,
Research and Production Company Spirit, LLC,
Irkutsk, Russia,
Associate Professor of the Department of Mineral Resources,
Irkutsk State University,
Irkutsk, Russia,
cta@spirit-irk.ru.



Вклад авторов / Contribution of the authors

Турецкая Н. Ю. – проведение вычислительных экспериментов, интерпретация полученных результатов; сбор, анализ и интерпретация результатов работы; общий надзор за исследовательской работой; подготовка рукописи к печати. Чикишева Т. А. – проведение вычислительных экспериментов, интерпретация полученных результатов; сбор, анализ и интерпретация результатов работы; общий надзор за исследовательской работой; выполнение минералогического анализа; подготовка рукописи к печати.

Turetskaya N. Yu. conducted computational experiments, processed the results, collected, analyzed and interpreted research results, performed general supervision of research work and prepared the copyright for publication. Chikisheva T. A. carried out computational experiments, processed the results, collected, analyzed and interpreted the research results, performed general supervision of research work, conducted mineralogical analysis and prepared the copyright for publication.

Конфликт интересов / Conflict of interests

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

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

Информация о статье / Information about the article

Статья поступила в редакцию 15.09.2022; одобрена после рецензирования 19.10.2022; принята к публикации 24.11.2022.

The article was submitted 15.09.2022; approved after reviewing 19.10.2022; accepted for publication 24.11.2022.



Научная статья

УДК 552.574

<https://doi.org/10.21285/2686-9993-2022-45-4-446-457>

Оценка возможности вовлечения в переработку углесодержащих отходов шламохранилища Западно-Сибирского металлургического комбината

Евгений Сергеевич Прокопьев^a, Ольга Леонидовна Алексеева^b^{a,b}*Институт земной коры СО РАН, г. Иркутск, Россия*^{a,b}*ООО «Научно-производственная компания «Спирит»», г. Иркутск, Россия*Автор, ответственный за переписку: Евгений Сергеевич Прокопьев, pes@spirit-irk.ru

Резюме. Целью исследования являлась возможность получения ликвидных продуктов обогащения (железосодержащего и угольного концентратов) из материала лежалых хвостов углеобогащения. Изучение вещественного состава исходных лежалых хвостов выполнено при помощи минералогического, гранулометрического и химического анализов. Технологические испытания осуществлены по гравитационно-магнитной схеме обогащения. В качестве основного обогатительного оборудования был выбран винтовой сепаратор. Доводочная операция проведена при помощи мокрой магнитной сепарации. В результате получен черновой гравитационный концентрат с массовой долей общего железа 25,3 %. Выход продукта составил 29,62 % с извлечением в него ценного компонента в размере 53,15 %. Выход полученного углесодержащего концентрата был равен 70,38 %, его зольность составила 31,7 %. В результате проведения доводочной операции на первичном гравитационном концентрате при помощи метода мокрой магнитной сепарации был получен железосодержащий концентрат. Выход продукта составил 0,44 % с извлечением в него ценного компонента в размере 1,97 %. Массовая доля общего железа составила 63,29 %. Таким образом, в статье показана потенциальная возможность вовлечения в переработку лежалых хвостов углеобогащения с получением товарной продукции, а именно железосодержащего концентрата и вторичного топлива – угольного концентрата, по экологически чистой технологии при низких энергозатратах и без дополнительных затрат на добычу.

Ключевые слова: шламохранилище, отходы углеобогащения, зольность, винтовая сепарация, экологически чистая технология, мокрая магнитная сепарация, железосодержащий концентрат, получение вторичного топлива, угольный концентрат

Финансирование: Работы выполнены в рамках комплексного научно-технического проекта Министерства науки и высшего образования Российской Федерации № 075-15-2022-1192 «Переработка хвостов угольных обогатительных фабрик с целью получения товарного угольного концентрата» при поддержке комплексной научно-технической программы полного инновационного цикла «Разработка и внедрение комплекса технологий в областях разведки и добычи твердых полезных ископаемых, обеспечения промышленной безопасности, биоремедиации, создания новых продуктов глубокой переработки угольного сырья при последовательном снижении экологической нагрузки на окружающую среду и рисков для жизни населения», утвержденной Распоряжением Правительства Российской Федерации № 1144-р от 11 мая 2022 г.

Для цитирования: Прокопьев Е. С., Алексеева О. Л. Оценка возможности вовлечения в переработку углесодержащих отходов шламохранилища Западно-Сибирского металлургического комбината // Науки о Земле и недропользование. 2022. Т. 45. № 4. С. 446–457. <https://doi.org/10.21285/2686-9993-2022-45-4-446-457>.

Original article

Evaluating the possibility for coal-containing waste of West Siberian Iron-and-Steel Works sludge storage to be involved in processing

Evgeny S. Prokopiev^a, Olga L. Alekseeva^b^{a,b}*Institute of the Earth's Crust SB RAS, Irkutsk, Russia*^{a,b}*Research and Production Company Spirit, LLC, Irkutsk, Russia*Corresponding author: Evgeny S. Prokopiev, pes@spirit-irk.ru



Abstract. The purpose of the study is investigate the possibility to obtain liquid concentration products (iron-containing and coal-containing concentrates) from the material of mature coal washing tailings. The study of the material composition of the original mature tailings was carried out using mineralogical, granulometric and chemical analyses. Technological tests were conducted according to the gravitational-magnetic concentration scheme. The spiral separator was chosen to be the main concentration equipment. Upgrading operation involved the use of wet magnetic separation. As a result, rough gravity concentrate with a mass fraction of total iron of 25.3 % was obtained. The product yield was 29.62 % with 53.15 % extraction of a valuable component into it. The output of the obtained coal-containing concentrate was 70.38 %, its ash content equaled 31.7 %. Having upgraded the primary gravity concentrate with the use of the wet magnetic separation method we obtained an iron-containing concentrate. The product yield was 0.44 % with 1.97 % extraction of a valuable component into it. The mass fraction of total iron was 63.29 %. Therefore, the article has demonstrated the potential possibility for mature tailings of coal cleaning to be involved in the processing with the production of marketable products such as iron-containing concentrate and secondary fuel in the form of coal concentrate using environmentally friendly technology, at low energy costs and without additional production costs.

Keywords: sludge storage, coal concentration waste, ash content, spiral separation, environmentally friendly technology, wet magnetic separation, iron-containing concentrate, secondary fuel production, coal concentrate

Funding: The study was performed in the frameworks of the integrated scientific and technical program of the Ministry of Science and Higher Education of the Russian Federation No. 075-15-2022-1192 "Processing of tailings of coal preparation plants to obtain commercial coal concentrate". The research was also supported by a comprehensive scientific and technical program of the full innovation cycle "Development and implementation of a set of technologies in the field of exploration and production of solid minerals, ensuring industrial safety, bio-remediation, creation of new products of coal raw material deep processing with a consistent reduction in the environmental load and risks to the population life" approved by the Decree of the Government of the Russian Federation No. 1144-p of May 11, 2022.

For citation: Prokopiev E. S., Alekseeva O. L. Evaluating the possibility for coal-containing waste of West Siberian Iron-and-Steel Works sludge storage to be involved in processing. *Nauki o Zemle i nedropol'zovanie = Earth sciences and subsoil use*. 2022;45(4):446-457. (In Russ.). <https://doi.org/10.21285/2686-9993-2022-45-4-446-457>.

Введение

Начиная с декабря 2020 г. цены на энергетические и коксующиеся угли стабильно растут. Это обусловлено политическими разногласиями и введением возникших вследствие них ограничений Китая на импорт угля из Австралии, а также ростом цен на сталь. Цены на энергетический уголь за первую половину 2021 г. выросли почти вдвое по сравнению со средним показателем за 2020 г. – в основном из-за увеличения использования электроэнергии, роста стоимости природного газа и перебоев в поставках из ключевых стран-экспортеров¹.

В Кемеровской области (Кузбассе, Россия) работает более 200 предприятий угольной отрасли, которые в ходе своей производственной деятельности ежегодно накапли-

вают свыше 2 млн т отходов угледобычи: породные отвалы, вскрышные отвалы, шламо-накопители обогатительных фабрик и т. п. В связи с этим особую актуальность приобретают современные технологии переработки отходов прошлых лет с целью повторного получения товарной продукции и последующей рекультивации земель² [1–10], а также их планомерное и комплексное внедрение на территории Кузбасса³.

Одним из крупнейших в Сибири сталелитейных заводов является ЕВРАЗ Объединенный Западно-Сибирский металлургический комбинат (ЕВРАЗ ЗСМК), по объему производства он входит в пятерку крупнейших в России. Предприятие характеризуется полным металлургическим циклом. Продукцию реализует в России и других странах Содружества

¹ Государственный доклад о состоянии и использовании минерально-сырьевых ресурсов Российской Федерации в 2020 году // Роснедра: федеральное агентство по недропользованию [Электронный ресурс]. URL: <https://www.rosnedra.gov.ru/data/Files/File/7992.pdf> (05.09.2022).

² Левкин Н. Д. Оценка геоэкологической ситуации и способы снижения деградации окружающей среды в угледобывающих промышленных регионах: дис. ... д-ра. техн. наук: 25.00.36. Тула, 2011. 234 с.

³ Об утверждении комплексной научно-технической программы полного инновационного цикла «Разработка и внедрение комплекса технологий в областях разведки и добычи твердых полезных ископаемых, обеспечения промышленной безопасности, биоремедиации, создания новых продуктов глубокой переработки из угольного сырья при последовательном снижении экологической нагрузки на окружающую среду и рисков для жизни населения: распоряжение Правительства Российской Федерации от 11 мая 2022 № 1144-р // Гарант: информационно-правовое обеспечение [Электронный ресурс]. URL: <https://base.garant.ru/404701149/> (05.09.2022).



Независимых Государств, экспортирует металл в 30 зарубежных государств. Входит в пятерку крупнейших производителей железнодорожных рельсов в стране.

Горнорудные активы включают в себя несколько горнодобывающих и горно-обогачительных предприятий на территории Кемеровской области (Таштагольский, Казский, Горно-Шорский рудники и Гурьевский карьер по добыче известняка, Абагурская обогаительно-агломерационная фабрика). Добыча железной руды осуществляется подземным способом. Предприятия обеспечивают поставки качественного железорудного сырья и известняка для производства металлопродукции на ЕВРАЗ ЗСМК.

Производство угольного концентрата осуществляется Центральной обогачительной фабрикой «Кузнецкая» (ЦОФ «Кузнецкая»), которая введена в эксплуатацию в 1966 г. «Кузнецкая» стала первой фабрикой в стране, перерабатывающей уголь, добываемый гидравлическим способом на шахте «Юбилейная». За 55 лет обогачительная фабрика переработала 229 млн т рядового угля, выпустила 169 млн т концентрата. Фабрика перерабатывает марки угля ГЖ и Ж. На сегодняшний день ей перерабатываются угли с шахт «Осинниковская», «Есаульская», «Ерунаковская-VIII», «Усковская», разреза «Распадский» и шахты «Распадская», а также шахты «Межегейуголь»⁴.

Шламохранилище ЗСМК представляет собой емкость для складирования отходов металлургического производства и углеотходов, поступающих с углеобогательного цеха коксоагломерационного производства, Западно-Сибирской ТЭЦ – филиала АО «ЕВРАЗ Объединенный Западно-Сибирский металлургический комбинат» (АО ЕВРАЗ ЗСМК), других цехов АО ЕВРАЗ ЗСМК и ЦОФ «Кузнецкая», образованной ограждающей дамбой, максимальная высота которой, согласно действующей проектной документации, составляет 53,5 м (I класс). Отходы, складированные в шламохранилище, относятся к IV и V классам опасности.

За последние 20 лет был проведен ряд

изысканий по бурению и определению содержания ценных компонентов в разных пробах по глубине бурения отвала [11]. Так, например, в Лаборатории утилизации промышленных отходов производственно-технического отдела АО ЕВРАЗ ЗСМК (1999 г.) исследован относительно сухой материал гидроотвала с намывных пляжей (декабрь 1998 г. – апрель 1999 г.), всего 70 проб. Пробы отбирали с поверхности гидроотвала, в ряде случаев с заглублением до 0,5 м, на расстоянии до 150 м от дамбы к центру гидроотвала. Расстояние между точками отбора – 25 м. ООО «Сибнии-углеобогащение» в 2012 г. выполняло следующие работы: буровой установкой на автошасси вынимался и исследовался материал скважин на глубину до 42 м [12]. Результаты анализа отобранных проб на зольность представлены в табл. 1.

На отобранном материале проведены исследования всех 13 проб на обогатимость. Окончательным выводом от суммы всех результатов является то, что всего выход товарного угольного сырья составил 26,2 % с зольностью 24,7 % [1].

Материалы и методы исследования

Исследования, результаты которых представлены в статье, проведены в отделе комплексного использования минерального сырья Института земной коры Сибирского отделения Российской академии наук. Цель работы заключалась в изучении возможности переработки материала шламохранилища ЗСМК с получением ликвидной продукции либо сырья, пригодного к использованию в металлургическом производстве. В процессе проведения технологических исследований решались следующие задачи:

- краткое изучение вещественного состава пробы техногенных отходов посредством гранулометрического, химического и минералогического анализов;

- проведение технологических испытаний по физическому обогащению материала пробы отходов углеобогащения, заскладированной в шламохранилище АО ЕВРАЗ ЗСМК.

⁴ Центральная обогачительная фабрика «Кузнецкая» // ПАО «Распадская» [Электронный ресурс]. URL: <https://www.raspadskaya.com/ru/company/assets/#accordion-kuznetskaya-washing-plant> (05.09.2022).



**Таблица 1. Изменение зольности по глубине шламохранилища
Западно-Сибирского металлургического комбината (результаты бурения)**
**Table 1. Change in ash content over the depth of the sludge storage
of the West-Siberian Iron-and-Steel Works (drilling results)**

Глубина, м	Проба											13
	1	2	3	4	5	6	7	8	9	10	11	
	Зольность, %											
0–2	–	–	59,7	59,6	59,1	65,6	67	59	68	74,5	63,5	60,5
2–4	–	–	65,9	64,3	63,1	61,8	57,5	59,7	76,7	70,5	68	50,5
4–6	–	–	60	59,8	62,2	72,1	58,9	48,4	74,4	65	49,5	48,2
6–8	–	–	73,1	69,9	73,3	63,9	67,3	46,6	79,4	69,5	73,6	55,4
8–10	–	–	63,5	42,1	74,3	63,4	55,1	47,6	83,4	71,7	60,1	37,5
10–12	–	–	65	43,1	56,1	51,2	61,1	54,1	85,1	73,7	67,5	45,9
12–14	–	–	58,1	45,8	42,3	38,4	47,9	46,5	90,9	77,5	58,6	52,8
14–16	–	–	50,1	48,7	38,7	33,2	45,4	40,7	98,5	83,9	51,7	44,6
16–18	–	–	46,4	46,4	56,6	50	57,2	48,9	98	84,6	39,9	44,8
18–20	–	–	59,1	45,4	52,6	55	68,7	56,2	98	82	49,6	44,7
20–22	–	–	58	51,5	50,5	52,5	52,5	49,6	95	85,8	66,8	58,9
22–24	–	–	63,5	53,2	60,8	52,8	60,5	54,6	92	75,5	62,7	63,4
24–26	–	–	64,4	57,5	56,4	54,4	50,5	61,2	93,2	71,4	68,9	58,2
26–28	–	–	69,9	48,3	50	53,5	56,2	49,7	96,9	80,4	73,2	60,7
28–30	–	–	64,3	58,6	48	49,2	61,5	50,2	99,4	77,2	70,6	60,5
30–32	–	–	54	32,5	52,2	64,2	44	52,5	95,3	76	73,3	59,2
32–34	–	–	70,1	67,8	43,4	48,4	50,1	47	89,6	77,2	66,1	54,5
34–36	–	–	75	76,6	51,1	44	51,7	46,7	84	71,6	67,5	48,4
36–38	–	–	75,1	75,4	61,6	71,9	48	40,6	63,1	63,4	57,6	45,3
38–40	–	–	60,5	70	57,6	69,8	42	35,4	38,2	52	54,6	41
40–42	–	–	–	–	–	–	–	–	–	–	61,7	43,7
Среднее	73,4	69,2	62,8	55,8	55,5	55,7	55,1	49,8	85	74,2	62,1	51,4

Объектом исследований стала проба отходов углеобогащения ЦОФ «Кузнецкая». Согласно данным, указанным в акте отбора пробы, местом отбора пробы являлось шламохранилище АО ЕВРАЗ ЗСМК. Технологической пробе присвоена маркировка УОФ (отходы угольной обогатительной фабрики).

Отходы угольной обогатительной фабрики были изучены на предмет возможности получения вторичного топлива в виде угольного концентрата и возможных попутных компонентов.

Оценка проведенных экспериментов производилась методом полуколичественного анализа при помощи портативного рентгенофлуоресцентного анализатора Olympus Vanta C-Series. Аналитические работы результатов опытов были выполнены методом количественного анализа в Испытательном аналитическом центре АО «Иргиредмет» (аттестат аккредитации № РОСС RU.0001.510043) с применением атомно-эмиссионного метода с индуктивно связанной плазмой (ICP-AES). Минеральный состав и количественная оценка

определены с помощью методов оптико-минералогического анализа с применением бинокулярного стереоскопического микроскопа МИКРОМЕД МС-2 ZOOM.

Результаты исследования и их обсуждения

Химический состав исходных проб установлен с помощью количественного анализа с применением атомно-эмиссионного метода с индуктивно-связанной плазмой (ICP-AES) (табл. 2).

Из табл. 1 видно, что материал хвостов углеобогащения состоит преимущественно из алюминия, кальция, железа, калия, магния, марганца, натрия и титана, однако результаты химического анализа позволяют определить основной ценный компонент, коим является железо (содержание в исходном материале общего железа равно 14,2 %). Редкие элементы содержатся в количестве, не превышающем кларк этих элементов в земной коре, и практического интереса не представляют.



Таблица 2. Химический состав исходной пробы отходов угольной обогатительной фабрики
Table 2. Chemical composition of the original sample of coal preparation plant waste

Элемент	Массовая доля, %
Ag	< 0,0001
Al	5,6
As	0,0015
B	< 0,0005
Ba	0,063
Be	< 0,0002
Bi	< 0,0005
Ca	2,9
Cd	< 0,0002
Co	0,001
Cr	0,0047
Cu	0,025
Fe	14,2
Hg	< 0,0005
K	1,1
La	0,0023
Mg	1,05
Mn	0,456
Mo	< 0,0002
Na	0,425
Ni	0,0018
P	0,073
Pb	0,0014
Sb	< 0,0003
Sc	0,0007
Se	< 0,0005
Sn	< 0,0005
Sr	0,021
Te	< 0,0005
Ti	0,225
V	0,0071
W	< 0,001
Y	0,0017
Zn	0,008
Zr	0,009

Гранулометрический состав изучен посредством фракционирования исходной пробы в соответствии с общепринятыми рекомендациями. Зольность выделенных классов (для пробы УОФ) определена согласно ГОСТ 11022-95⁵ (табл. 3).

Гранулометрический анализ показывает, что материал отходов углеобогащения на 63,64 % представлен крупнозернистым материалом, в основном классом крупности +2 мм. На диапазон классов крупности -2+0,125 мм приходится 33,88 % материала. Выход шлами-

стых классов крупности (-0,125+0,0 мм) составляет 2,48 %.

Необходимо отметить высокую зольность материала: значения зольности сухого топлива колеблются от 55,17 до 87,16 % при средневзвешенном значении в исходной пробе 76,09 %, что подтверждает результаты опробования отвала хвостов ЦОФ «Кузнецкая» прошлых лет.

Последовательность операций по определению минерального состава пробы УОФ была следующей:

⁵ ГОСТ 11022-953. Топливо твердое минеральное. Методы определения зольности // Консорциум кодекс [Электронный ресурс]. URL: <https://docs.cntd.ru/document/1200024148> (05.09.2022).



– определение минерального состава исходной пробы (результаты представлены в табл. 4);

– гравитационное фракционирование исходной пробы (результаты представлены в табл. 5);

– магнитное фракционирование тяжелой фракции (результаты представлены в табл. 6).

По данным табл. 4 видно, что основную массу пробы (78,08 %) составляют карбонат-углистые агрегаты и обломки пород. Уголь со-

ставляет 13,5 % от всей массы пробы, карбонаты с примесью угля – 2,33 %. В пробе присутствуют карбонаты (3,51 %), кварц (1,5 %), гидроксиды железа (0,17 %), магнетит (0,24 %), сульфиды (пирит, халькопирит – 0,65 %) и барит (0,01 %). В единичных зернах отмечены пироксены, амфиболы, эпидот, клейофан, хлорит и циркон.

Из табл. 6 видно, что основную массу тяжелой фракции составляет немагнитная фракция (97,22 %).

Таблица 3. Гранулометрическая характеристика, зольность и распределение железа по классам крупности в исходной пробе отходов угольной обогатительной фабрики
Table 3. Granulometric characteristics, ash content and iron distribution by size classes in the original coal preparation plant waste sample

Класс крупности, мм	Выход, %	Зольность сухого топлива, %	Массовая доля железа, %	Распределение, %	
				Зольность сухого топлива	Массовая доля железа
+25	6,5	87,16	16,2	7,45	7,62
-25+15	9,93	80,47	16,1	10,5	11,56
-15+8	20,1	76,32	14,04	20,16	20,41
-8+4	14,54	73,64	12,42	14,07	13,06
-4+2	12,57	73,5	15,6	12,15	14,19
-2+1	11,21	72,87	11,93	10,73	9,67
-1+0,5	11,46	83,93	12,61	12,64	10,45
-0,5+0,25	8,73	68,29	14,98	7,83	9,45
-0,25+0,125	2,48	75,58	15,1	2,46	2,71
-0,125+0,071	0,77	68,75	8,95	0,7	0,5
-0,071+0,04	0,43	55,17	3,6	0,31	0,11
-0,04+0	1,28	58,67	2,96	0,99	0,27
Всего	100	76,09	13,83	100	100

Таблица 4. Минеральный состав пробы отходов угольной обогатительной фабрики
Table 4. Mineral composition of the coal preparation plant waste sample

Минерал	Содержание, масс. %
Уголь	13,5
Карбонаты с примесью угля	2,33
Карбонаты (кальцит, доломит)	3,51
Кварц	1,5
Гидроксиды железа	0,17
Магнетит	0,24
Сульфиды (пирит, халькопирит)	0,65
Барит	0,01
Эпидот	Единичные зерна
Пироксены	
Амфиболы	
Клейофан	
Хлорит	
Циркон	
Апатит	
Карбонат-углистые агрегаты и обломки пород	78,08
Итого	99,99



Таблица 5. Результаты гравитационного фракционирования исходной пробы отходов угольной обогатительной фабрики

Table 5. The results of gravitational fractionation of the original sample of the coal preparation plant waste

Фракция	Выход, %	Минералы
Легкая (менее 2,9 г/см ³)	67,42	Карбонаты, уголь, кварц, карбонаты с примесью угля, гидроксиды железа, обломки пород, карбонат-углистые агрегаты
Тяжелая (более 2,9 г/см ³)	32,58	Магнетит, гидроксиды железа, сульфиды, карбонаты (кальцит, доломит), карбонаты с примесью угля, амфиболы, пироксены, эпидот, барит, хлорит, клейофан, циркон, обломки пород, карбонат-углистые агрегаты, апатит
Итого	100	–

Таблица 6. Результаты магнитного фракционирования тяжелой фракции

Table 6. Results of heavy fraction magnetic fractionation

Фракция	Выход, % от операции	Выход, % от исходного	Минералы
Магнитная фракция	2,69	0,87	Магнетит, гидроксиды железа, сростки с магнетитом
Электромагнитная фракция	0,09	0,03	Гидроксиды железа, амфиболы, пироксены, эпидот, хлорит, обломки пород
Немагнитная фракция	97,22	31,68	Сульфиды, барит, карбонаты (кальцит, доломит), амфиболы, клейофан, циркон, гидроксиды железа, барит, карбонат-углистые агрегаты, апатит
Итого	100	32,58	–

Обобщая результаты изучения вещественного состава исходной пробы, можно заключить, что основными ценными компонентами предоставленной пробы хвостов углеобогащения являются уголь и железо.

Также авторами были отмечены следующие характерные показатели:

- средневзвешенное значение зольности сухого топлива – 75,85 %, что говорит о низком содержании угольных составляющих (по результатам минералогического анализа уголь составляет 13,8 % от всей массы пробы);

- содержание общего железа в исходной пробе – 14,2 %;

- гранулометрический анализ показывает, что проба на 63,64 % представлена крупнозернистым материалом классом крупности +2 мм, на диапазон классов крупности -2+0,125 мм приходится 33,88 % материала, выход шламистых классов крупности (-0,125+0 мм) составляет 2,48 %.

Основным критерием выбора в пользу определения метода переработки отходов производств, безусловно, является экономический. Только в случае превышения прогнозируемых доходов от использования техно-

генных ресурсов над затратами на разработку и внедрение технологических решений с учетом экологических преимуществ возможно ожидание крупномасштабного процесса рециклинга отходов. В связи с этим на первое место выдвигаются задачи разработки технологических решений и схем для переработки сложного техногенного ресурса.

При выборе рационального метода переработки материала гидроотвалов необходимо учесть физико-химические свойства твердой фазы и определить его приоритетные зоны для переработки. Результаты ситового и фракционного анализа дают возможность прогнозировать способ и технологию процессов обогащения.

Особенностями технологии переработки извлекаемого материала из гидроотвалов, в отличие от технологии, использующейся на обогатительных фабриках, является их высокая зольность, а также колебания зольности и гранулометрического состава извлекаемого продукта. Многими исследователями сделано заключение о том, что для угольного шлама крупностью 0,1–1 мм имеют преимущество винтовые сепараторы [13–15].



Применительно к сырью, описанному в данной статье, был сделан выбор в пользу применения технологии винтовой сепарации как метода, являющегося экологически чистым, визуально наблюдаемым и эффективным в плане извлечения железосодержащего компонента и выведения в легкую фракцию угольной составляющей [16–20]. Доводка железосодержащего концентрата проводилась методом мокрой магнитной сепарации.

Схема получения черного гравеоконцентрата включала в себя (рис. 1):

- предварительное грохочение материала по классу 0,5 мм;
- стадийное измельчение материала до крупности -0,5 мм;
- основную винтовую сепарацию и контрольную винтовую сепарацию.

При проведении основной винтовой сепарации и контрольной винтовой сепарации использован винтовой сепаратор для обогащения шламов типа СВШ-500. При гравитационном обогащении соблюдался следующий режим винтовой сепарации: производительность по твердому – до 250 кг/ч при содержании твердого в питании 40 %.

Результаты обогащения пробы методом винтовой сепарации представлены в табл. 7.

При проведении двух операций винтовой сепарации получены следующие продукты:

- черновой гравеоконцентрат с содержанием железа 25,3 % и извлечением 53,15 % при его выходе 29,62 %;
- хвосты (хвосты основной винтовой сепарации и хвосты контрольной винтовой сепарации) с содержанием железа 9,39 % и зольностью на уровне 31,7 %.

Исследования возможности доводки гравеоконцентрата методом мокрой магнитной сепарации выполнены на электромагнитном барабанном сепараторе марки 120Т-СЭМ с нижним питанием и проточной ванной. Данный аппарат предназначен для мокрого магнитного обогащения сильномагнитных руд.

Технологическая схема доводки гравеоконцентрата методом мокрой магнитной сепарации представлена на рис. 2. Полученные технологические показатели приведены в табл. 8.

Доводка первичного гравеоконцентрата методом мокрой магнитной сепарации позволяет получить магнитную фракцию (железосодержащий концентрат) с содержанием общего железа 63,29 % и извлечь 1,97 % железа при выходе продукта 0,44 %. Такой выход магнитной фракции (0,44 %) говорит о низком содержании сильномагнитного материала в пробе.



Рис. 1. Технологическая схема обогащения пробы отходов угольной обогатительной фабрики при получении черного гравеоконцентрата

Fig. 1. Technological scheme of concentration of a coal preparation plant waste sample when obtaining rough gravity concentrate



Таблица 7. Технологические показатели получения черного гравеоконцентрата
Table 7. Technological indicators of obtaining rough gravity concentrate

Продукт	Выход, %	Массовая доля общего железа, %	Извлечение железа, %	Зольность, %
Основная винтовая сепарация (ОВС) на СВШ-500				
Концентрат ОВС	23,81	25,86	43,66	86
Промпродукт ОВС	26,39	16,34	30,57	72,7
Хвосты ОВС	49,8	7,3	25,77	31,2
Итого: исходная проба	100	14,11	100	75,8
Контрольная винтовая сепарация (КВС) на СВШ-500				
Концентрат КВС	5,81	23,06	9,49	88,3
Хвосты КВС	20,59	14,44	21,07	32,1
Итого: промпродукт ОВС	26,39	16,34	30,57	72,7
Сводные показатели				
Черновой гравеоконцентрат (концентрат ОВС + концентрат КВС)	29,62	25,3	53,15	86,9
Хвосты (хвосты ОВС + хвосты КВС)	70,38	9,39	46,85	31,7
Итого: исходная проба	100	14,11	100	75,8



Рис. 2. Технологическая схема доводки гравеоконцентрата методом мокрой магнитной сепарации
Fig. 2. Technological scheme of gravity concentrate upgrading by wet magnetic separation

Таблица 8. Технологические показатели обогащения пробы отходов угольной обогатительной фабрики с доводкой методом мокрой магнитной сепарации
Table 8. Technological indicators of concentration of the coal preparation plant waste sample upgraded by wet magnetic separation

Продукт	Выход, % от исходного материала	Массовая доля общего железа, %	Извлечение общего железа, % от исходного материала
Мокрая магнитная сепарация ($I = 0,8 \text{ A}$)			
Магнитная фракция	0,44	63,29	1,97
Немагнитная фракция	29,18	24,73	51,18
Итого: черновой гравеоконцентрат	29,62	25,3	53,15
Сводные показатели			
Железосодержащий концентрат (магнитная фракция)	0,44	63,29	1,97
Хвосты отвальные (хвосты ОВС, хвосты КВС и немагнитная фракция)	99,56	13,89	98,03
Итого: исходная проба	100	14,11	100

В немагнитную фракцию извлечение железа составило 96,29 % с содержанием 24,73 % при исходном содержании в питании доводочной операции общего железа 25,3 %.

Заключение

Исследованную технологическую пробу из шламохранилища АО ЕВРАЗ ЗСМК, представленную лежащими хвостами углеобогат-



щения ЦОФ «Кузнецкая», можно рассматривать как техногенное железо- и углесодержащее сырье.

Оценивая представленную информацию, можно сделать следующие выводы:

1. В ходе тестовых испытаний по возможности переработки отходов угольной обогатительной фабрики по гравитационно-магнитной технологии был получен черновой гравитоконцентрат с содержанием общего железа 25,3 % и извлечением 53,15 %.

2. Получено вторичное топливо – углесо-

державший концентрат с зольностью 31,7 %.

3. При доводке первичного гравитоконцентрата методом мокрой магнитной сепарации получен железосодержавший концентрат с содержанием общего железа 63,29 %.

Результаты технологических испытаний позволяют сделать заключение о потенциальной возможности вовлечения в переработку лежалых хвостов углеобогащения с получением товарной продукции, а именно железосодержавшего концентрата и вторичного топлива – угольного концентрата.

Список источников

1. Хамзина Т. Угольный шлам: вторая жизнь // Глобус. 2021. № 1. [Электронный ресурс]. URL: [https://www.vnedra.ru/tehnologii/ugolnyy-shlam-vtoraya-zhizn-13710/\(05.09.2022\)](https://www.vnedra.ru/tehnologii/ugolnyy-shlam-vtoraya-zhizn-13710/(05.09.2022)).
2. Шадренова И. В., Зелинская Е. В., Волкова Н. А., Орехова Н. Н. Горнопромышленные отходы: ресурсный потенциал и технологии переработки (на примере Сибири и Урала) // Современные проблемы комплексной переработки труднообогатимых руд и техногенного сырья (Плаксинские чтения – 2017): материалы Международ. науч. конф. (г. Красноярск, 12–15 сентября 2017 г.). Красноярск: Изд-во СФУ, 2017. С. 15–21.
3. Белоусов В. А. Перспективные методы обогащения угольных шламов // Международный журнал прикладных и фундаментальных исследований. 2014. № 4. С. 15–17.
4. Новак В. И., Козлов В. А. Обзор современных способов обогащения угольных шламов // Горный информационно-аналитический бюллетень (научно-технический журнал). 2012. Отдельный выпуск № 5. Угледобыча: технологии, безопасность, переработка и обогащение. С. 130–138.
5. Сокур А. К. Обзор гравитационных технологий обогащения угольных шламов нефлотационной крупности // Обогащения корисних копалин: наук.-техн. зб. 2012. № 51. С. 126–136.
6. Качурин Н. М., Ефимов В. И., Мосина Е. К., Факторович В. В. Перспективы экологически безопасного использования отходов производства на территориях горнодобывающих регионов // Безопасность труда в промышленности. 2014. № 9. С. 81–84.
7. Качурин Н. М., Воробьев С. А., Чистяков Я. В., Рыбак Л. Л. Экологические последствия закрытия угольных шахт Кузбасса по газодинамическому фактору и опасности эндогенных пожаров на отвалах // Экология и промышленность России. 2015. Т. 19. № 4. С. 54–58.
8. Дамба А., Станис Е. В. Использование комплексной геоэкологической оценки в экологическом аудите при разработке угольных месторождений Монголии // Вестник Российского университета дружбы народов. Серия: Экология и безопасность жизнедеятельности. 2015. № 2. С. 100–106.
9. Киреев С. А. Современное состояние и экологическая оценка влияния породных отвалов предприятия угольной промышленности // Известия Тульского государственного университета. Науки о Земле. 2022. № 1. С. 62–71. <https://doi.org/10.46689/2218-5194-2022-1-1-62-71>.
10. Таразанов И. Итоги работы угольной промышленности России за 2012 год // Уголь. 2013. № 3. С. 78–90.
11. Новак В. И., Козлов В. А. Обзор современных способов обогащения угольных шламов // Горный информационно-аналитический бюллетень (научно-технический журнал). 2012. Отдельный выпуск № 5. Угледобыча: технологии, безопасность, переработка и обогащение. С. 130–138.
12. Гришин И. А., Князбаев Ж. С. К проблеме выбора метода обогащения для углей различной стадии метаморфизма // Успехи современного естествознания. 2016. № 1. С. 107–110.
13. Бобриков В. В., Калабухов М. Л., Канев Н. И. Исследования и совершенствование процессов классификации и обогащения угольного шлама на Печеровской ЦОФ // III Конгресс обогатителей стран СНГ (г. Москва, 19–22 марта 2001 г.). М.: Изд-во МИСиС, 2001. С. 69–75.
14. Прокопьев С. А., Пономарева А. М., Болотин М. Л. Переработка техногенного сырья углеобогачительной фабрики // Экологические проблемы и новые технологии комплексной переработки минерального сырья (Плаксинские чтения – 2002): материалы Международ. совещ. (г. Чита, 16–19 сентября 2002 г.). Чита: ПКЦ-Альтекс, 2002. С. 79–82.
15. Козлов В. А., Новак В. И. Оптимизация работы углеобогачительной фабрики с целью получения максимального выхода концентрата // Горный информационно-аналитический бюллетень (научно-технический журнал). 2019. № 4. С. 175–186. <https://doi.org/10.25018/0236-1493-2019-04-0-175-186>.
16. Иванов В. Д., Прокопьев С. А. Винтовые аппараты для обогащения руд и песков в России. М.: Дакси, 2000. 239 с.
17. Аникин М. Ф., Иванов В. Д., Певзнер М. Л. Винтовые аппараты для обогащения руд. М.: Недра, 1970. 181 с.
18. Яшин А. В., Аникин М. Ф., Скрипко В. А. Сепараторщик винтовых аппаратов. М.: Недра, 1984. 102 с.
19. Турецкая Н. Ю., Прокопьев С. А., Прокопьев



Е. С. Разработка эффективной низкзатратной технологии получения угольного концентрата и железосодержащего продукта из шламов илов гидроотвала Касьяновской ОФ // XII Конгресс обогатителей стран СНГ (г. Москва, 25–27 февраля 2019 г.). М.: Изд-во МИСиС,

2019. С. 205–209.

20. Кочетов В. В., Левандович А. П., Беринберг З. Ш., Кирнарский А. С., Пилов П. И. Применение винтовых сепараторов при обогащении углей // Обогащение полезных ископаемых. 1998. № 1. С. 80–87.

References

1. Khamzina T. Coal sludge: a second life. *Globus*. 2021;1. Available from: <https://www.vnedra.ru/tehnologii/ugolnyj-shlam-vtoraya-zhizn-13710/> [Accessed 5th September 2022]. (In Russ.).
2. Shadrinova I. V., Zelinskaya E. V., Volkova N. A., Orekhova N. N. Mining waste: resource potential and processing technologies (for the case of Siberia and the Urals). In: *Sovremennye problemy kompleksnoi pererabotki trudnoobogatimyykh rud i tekhnogennogo syr'ya (Plaksinskie chteniya – 2017): materialy Mezhdunar. nauch. konf. = Modern problems of complex processing of refractory ores and technogenic raw materials (Plaksinsky readings – 2017): materials of the International scientific conference*. 12–15 September 2017, Krasnoyarsk. Krasnoyarsk: Siberian Federal University; 2017, p. 15–21. (In Russ.).
3. Belousov V. A. Promising methods of coal sludge concentration. *Mezhdunarodnyi zhurnal prikladnykh i fundamental'nykh issledovaniy*. 2014;4:15-17. (In Russ.).
4. Novak V. I., Kozlov V. A. Review of modern methods of coal sludge concentration. *Gornyi informatsionno-analiticheskii byulleten' (nauchno-tekhnicheskii zhurnal) = Mining informational and analytical bulletin (scientific and technical journal)*. 2012;5:130-138. (In Russ.).
5. Sokur A. K. Review of gravitational concentration technologies for coal sludge of non-flotation size. *Obogashchenie poleznykh iskopayemykh: nauch.-tekhn. sb.* 2012; 51:126-136. (In Ukrainian).
6. Kachurin N. M., Efimov V. I., Mosina E. K., Faktorovich V. V. Prospects of environmentally safe use of production waste in mining regions. *Bezopasnost' truda v promyshlennosti = Journal of Research and Production*. 2014;9:81-84. (In Russ.).
7. Kachurin N. M., Vorob'ev S. A., Chistyakov Ya. V., Rybak L. L. Environmental consequences of coal mines of Kuznetsk basin by the gasdynamic factor and hazard of endogenous fires at dumps. *Ekologiya i promyshlennost' Rossii = Ecology and Industry of Russia*. 2015;19(4):54-58. (In Russ.).
8. Damba A., Stanis E. V. The use of an integrated geo-ecological assessment in environmental audit at the open coal mining in Mongolia. *Vestnik Rossiiskogo universiteta druzhby narodov. Seriya: Ekologiya i bezopasnost' zhiznedeyatel'nosti = RUDN Journal of Ecology and Life Safety*. 2015;2:100-106. (In Russ.).
9. Kireev S. A. The current state and environmental assessment of the impact of rock dumps of coal industry enterprises. *Izvestiya Tul'skogo gosudarstvennogo universiteta. Nauki o Zemle*. 2022;1:62-71. (In Russ.). <https://doi.org/10.46689/2218-5194-2022-1-1-62-71>.
10. Tarazanov I. Russian coal industry performance in 2012. *Ugol' = Russian Coal Journal*. 2013;3:78-90. (In Russ.).
11. Novak V. I., Kozlov V. A. Review of modern methods of coal sludge concentraton. *Gornyi informatsionno-analiticheskii byulleten' (nauchno-tekhnicheskii zhurnal) = Mining informational and analytical bulletin (scientific and technical journal)*. 2012;5:130-138. (In Russ.).
12. Grishin I. A., Knyazbaev Z. S. To the enrichment method choice problem for coals of various stage of the metamorphism. *Uspekhi sovremennogo estestvoznaniya*. 2016;1:107-110. (In Russ.).
13. Bobrikov V. V., Kalabukhov M. L., Kanev N. I. Research and improvement of the classification and concentration processes of coal sludge at the Pecherovskaya central dressing plant. In: *III Kongress obogatitelei stran SNG = 3^d CIS Congress of the Mineral Processing Engineers*. 19–22 March 2001, Moscow. Moscow: National University of Science and Technology (MISiS); 2001, p. 69–75. (In Russ.).
14. Prokop'ev S. A., Ponomareva A. M., Bolotin M. L. Processing of technogenic raw materials of a coal cleaning plant. In: *Ekologicheskie problemy i novye tekhnologii kompleksnoi pererabotki mineral'nogo syr'ya (Plaksinskie chteniya – 2002): materialy Mezhdunar. soveshch. = Environmental problems and new technologies for the complex processing of mineral raw materials (Plaksinsky readings – 2002): materials of the International meeting*. 16–19 September 2002, Chita. Chita: PKTs-Al'teks; 2002, p. 79–82. (In Russ.).
15. Kozlov V. A., Novak V. I. Optimizing coal preparation plant performance towards maximum concentrate yield. *Gornyi informatsionno-analiticheskii byulleten' (nauchno-tekhnicheskii zhurnal) = Mining informational and analytical bulletin (scientific and technical journal)*. 2019; 4:175-186. (In Russ.). <https://doi.org/10.25018/0236-1493-2019-04-0-175-186>.
16. Ivanov V. D., Prokop'ev S. A. *Spiral machines for ores and sands concentration in Russia*. Moscow: Daksi; 2000. 239 p. (In Russ.).
17. Anikin M. F., Ivanov V. D., Pevzner M. L. *Spiral machines for ore dressing*. Moscow: Nedra; 1970. 181 p. (In Russ.).
18. Yashin A. V., Anikin M. F., Skripko V. A. *Spiral machine separator*. Moscow: Nedra; 1984. 102 p. (In Russ.).
19. Turetskaya N. Yu., Prokop'ev S. A., Prokop'ev E. S. Development of an effective low-cost technology for obtaining coal concentrate and iron-containing product from the silt sludge of the hydraulic dump of the Kasyanovskaya ore-dressing plant. In: *XII Kongress obogatitelei stran SNG = 12th CIS Congress of the Mineral Processing Engineers*. 25–27 February 2019, Moscow. Moscow: National University of Science and Technology (MISiS); 2019, p. 205–209. (In Russ.).
20. Kochetov V. V., Levandovich A. P., Berinberg Z. Sh., Kirnar'skii A. S., Pilov P. I. Use of spiral separators in coal cleaning. *Obogashchenie poleznykh iskopayemykh*. 1998;1:80-87. (In Russ.).



Информация об авторах / Information about the authors



Прокопьев Евгений Сергеевич,
ведущий инженер отдела комплексного использования минерального сырья,
Институт земной коры СО РАН,
г. Иркутск, Россия,
директор по технологиям и инновациям,
ООО «Научно-производственная компания “Спирит”»,
г. Иркутск, Россия,
pes@spirit-irk.ru.
Evgeny S. Prokopiev,
Leading Engineer of the Department of Integrated Use of Mineral Raw Materials,
Institute of the Earth's Crust SB RAS,
Irkutsk, Russia,
Director for Technology and Innovation,
Research and Production Company Spirit, LLC,
Irkutsk, Russia,
pes@spirit-irk.ru.



Алексеева Ольга Леонидовна,
ведущий инженер отдела комплексного использования минерального сырья,
Институт земной коры СО РАН,
г. Иркутск, Россия,
директор по экономике и финансам,
ООО «Научно-производственная компания “Спирит”»,
г. Иркутск, Россия,
aol@spirit-irk.ru.
Olga L. Alekseeva,
Leading Engineer of the Department of Integrated Use of Mineral Raw Materials,
Institute of the Earth's Crust SB RAS,
Irkutsk, Russia,
Director for Economics and Finance,
Research and Production Company Spirit, LLC,
Irkutsk, Russia,
aol@spirit-irk.ru.

Вклад авторов / Contribution of the authors

Прокопьев Е. С. – научное руководство исследованием, формулировка научных гипотез, описание результатов и формирование выводов исследования, табличное и графическое представление результатов, подготовка рукописи к печати. Алексеева А. О. – анализ литературы, сбор статистических данных, подготовка рукописи к печати.

Prokopiev E. S. gave academic advice on the research, formulated scientific hypotheses, described the results, derived the conclusions of the study as well as presented the research results in the form of graphs and tables, prepared the copyright for publication. Alekseeva O. L. analyzed the literature, collected the statistical data and prepared the copyright for publication.

Конфликт интересов / Conflict of interests

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

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

Информация о статье / Information about the article

Статья поступила в редакцию 08.09.2022; одобрена после рецензирования 06.10.2022; принята к публикации 11.11.2022.

The article was submitted 08.09.2022; approved after reviewing 06.10.2022; accepted for publication 11.11.2022.



Научная статья

УДК 552.574

<https://doi.org/10.21285/2686-9993-2022-45-4-458-468>

Обзор гравитационных технологий обогащения угольных шламов

Сергей Амперович Прокопьев^а^аИнститут земной коры СО РАН, г. Иркутск, Россия^бООО «Научно-производственная компания «Спирит»», г. Иркутск, Россия

Резюме. Цель представленного исследования заключалась в сборе данных и анализе современных тенденций развития гравитационных технологий и оборудования для обогащения угольных шламов. В ходе работы было проведено обобщение научно-технической информации, а также ее анализ. В результате отмечено, что в последние годы предприняты попытки обогащения угольных шламов преимущественно гравитационными методами. Каждый из этих методов включает ряд процессов, основанных на общих физических и физико-химических свойствах, по которым производится разделение материала, а также на отличающихся друг от друга использованием дополнительных разделяющихся силах и соответствующих конструкциях машин и аппаратов. К данным аппаратам относятся тяжелосредные циклоны, винтовые сепараторы, гидросайзеры, концентрационные столы и отсадочные машины. Автор рассмотрены принципы работы перечисленного гравитационного оборудования, а также показаны преимущества и недостатки каждого из этих аппаратов. Приведенные данные свидетельствуют о том, что применяемому в настоящее время оборудованию для обогащения угольного шлама характерны удовлетворительные показатели средневероятного отклонения. Для выявления рациональной топологии схем обогащения конкретного объекта выбирается наиболее оптимальный вид гравитационного оборудования, а также их сочетание в зависимости от характеристики вещественного состава. Анализ данных показал, что наиболее перспективным, высокоэффективным, результативным, экологически чистым и ресурсосберегающим гравитационным методом обогащения является винтовая сепарация.

Ключевые слова: гравитационный метод обогащения, угольные шламы, отсадка, тяжелосредный гидроциклон, гидросайзер, винтовой сепаратор

Финансирование: Работы выполнены в рамках комплексного научно-технического проекта Министерства науки и высшего образования Российской Федерации № 075-15-2022-1192 «Переработка хвостов угольных обогатительных фабрик с целью получения товарного угольного концентрата» при поддержке комплексной научно-технической программы полного инновационного цикла «Разработка и внедрение комплекса технологий в областях разведки и добычи твердых полезных ископаемых, обеспечения промышленной безопасности, биоремедиации, создания новых продуктов глубокой переработки угольного сырья при последовательном снижении экологической нагрузки на окружающую среду и рисков для жизни населения», утвержденной Распоряжением Правительства Российской Федерации № 1144-р от 11 мая 2022 г.

Для цитирования: Прокопьев С. А. Обзор гравитационных технологий обогащения угольных шламов // Науки о Земле и недропользование. 2022. Т. 45. № 4. С. 458–468. <https://doi.org/10.21285/2686-9993-2022-45-4-458-468>.

Original article

Overview of coal sludge gravity concentration technologies

Sergey A. Prokopiev^а^аInstitute of the Earth's Crust SB RAS, Irkutsk, Russia^аResearch and Production Company Spirit, LLC, Irkutsk, Russia

Abstract. The purpose of the study is to collect data and analyze modern development trends of gravity concentration technologies and equipment for coal sludge enrichment. Conducted generalization and analysis of scientific and technical information allowed to state that some attempts have been made recently to enrich coal slimes using mainly gravity concentration methods. Each of these methods involves a number of processes based on general physical and physicochemical properties serving the criteria for material separation as well as on the differently applied additional separating forces and machinery and apparatus designs. The latter include heavy-media cyclones, spiral separators, hydrosizers, concentration tables and wash boxes. The author considers the operation principle of the listed gravity equipment, demonstrates the advantages and disadvantages of each of the apparatuses. The data given indicate that, modern gravity equipment



used for coal sludge enrichment features satisfactory indicators of the average probable deviation. To identify the rational topology of concentration diagrams for a particular object, the most optimal type of gravity concentration equipment or its combination is selected depending on the characteristics of the material composition. The analysis of data has shown that the most promising, highly efficient, effective, environmentally friendly and resource-saving gravity concentration method is spiral separation.

Keywords: gravity concentration method, coal slimes, jigging, heavy-medium hydrocyclone, hydrosizer, spiral separator

Funding: The study was performed in the frameworks of the integrated scientific and technical program of the Ministry of Science and Higher Education of the Russian Federation No. 075-15-2022-1192 "Processing of tailings of coal preparation plants to obtain commercial coal concentrate". The research was also supported by a comprehensive scientific and technical program of the full innovation cycle "Development and implementation of a set of technologies in the field of exploration and production of solid minerals, ensuring industrial safety, bio-remediation, creation of new products of coal raw material deep processing with a consistent reduction in the environmental load and risks to the population life" approved by the Decree of the Government of the Russian Federation No. 1144-p of May 11, 2022.

For citation: Prokopiev S. A. Overview of coal sludge gravity concentration technologies. *Nauki o Zemle i nedropol'zovanie = Earth sciences and subsoil use*. 2022;45(4):458-468. (In Russ.). <https://doi.org/10.21285/2686-9993-2022-45-4-458-468>.

Введение

Ископаемые угли являются наиболее распространенным видом минерального сырья, выявленным на всех континентах земного шара. Согласно данным государственного доклада о состоянии и использовании минерально-сырьевых ресурсов Российской Федерации в 2020 г.¹, Россия занимает четвертое место в мире. Большую часть угля потребляют электростанции и металлургическая промышленность страны, а также коммунально-бытовое хозяйство, строительное производство, химическая промышленность.

Кузнецкий угольный бассейн – главный угольный бассейн России. Он расположен на юге Западной Сибири, в основном на территории Кемеровской области (частично на территории Новосибирской области и Алтайского края), в неглубокой котловине между горными массивами Кузнецкого Алатау. Данный угольный бассейн обладает большими запасами высококачественного угля и обеспечивает более половины отечественной угледобычи, в том числе 80 % коксующихся углей. Основными потребителями угля выступают электростанции и металлургическое производство не только внутри страны, но и за ее пределами.

Одной из ключевых проблем региона является возрастающая с каждым годом за счет предприятий угледобычи нагрузка на экосистему. В данных регионах экологическое состояние характеризуется как кризисное и даже катастрофическое, что обусловлено образованием большого количества разнообразных отходов в зависимости от основного вида производства^{2,3} [1].

Горные массы, извлекаемые из угленосных толщ в шахтах и на разрезах, представляют собой природный агрегат угля с вмещающей породой, поэтому с целью повышения качества угольных концентратов требуется удаление из него высокозольной составляющей. Технология и техника обогащения должны обеспечивать максимальное извлечение горючих компонентов в товарный продукт и соответствовать соблюдению всех установленных экологических требований^{4,5}.

Образованные в ходе работ углеобогачительных фабрик гидроотвалы и шламоотстойники также несут в своем составе уголь (технологические потери углеобогачительных фабрик), в связи с чем их можно рассматривать как альтернативный источник получения энергетических и коксующихся концентратов.

¹ Государственный доклад о состоянии и использовании минерально-сырьевых ресурсов Российской Федерации в 2020 году // Роснедра: федеральное агентство по недропользованию [Электронный ресурс]. URL: <https://www.rosnedra.gov.ru/data/Files/File/7992.pdf> (05.09.2022).

² К 300-летию Кузбасса: история промышленного освоения // Роснедра: федеральное агентство по недропользованию [Электронный ресурс]. URL: <https://www.rosnedra.gov.ru/article/13345.html> (22.09.2022).

³ Кузнецкий угольный бассейн // Академик [Электронный ресурс]. URL: <https://dic.academic.ru/dic.nsf/ruwiki/54975> (12.09.2022).

⁴ Бедрань Н.Г. Обогащение углей: учебник. М.: Недра, 1988. 206 с.

⁵ Беринберг З. Ш., Благоев И. С., Борц М. А. [и др.]. Обогащение углей: справочник / под ред. И. С. Благоева. М.: Недра, 1984. 614 с.



Поэтому разработка технологий эффективной переработки угольных шламов является актуальной в настоящее время. Вовлечение угольных шламов в переработку позволит улучшить экологическую обстановку, снизить экономические затраты на содержание и рекультивацию данных объектов.

Гравитационные методы обогащения занимают ведущее место среди других методов в практике переработки добытого угля и накопленных углесодержащих шламовых отходов в гидроотвалах, шламоотстойниках. Для данного метода обогащения контрастным разделительным параметром является плотность минералов, составляющих породу. Высокая производительность гравитационных машин позволяет упрощать схему цепи аппаратов фабрик, более экономично использовать производственные площади и объемы зданий, в результате чего снижаются удельные капитальные затраты на строительство обогатительных фабрик, уменьшается число обслуживающего персонала, понижается себестоимость переработки [2–5]. В качестве среды, в которой осуществляется гравитационное обогащение угля, используются: при мокром обогащении – вода, тяжелые суспензии или растворы; при пневматическом – воздух. Наиболее часто применяется метод мокрого обогащения. Применение пневматического метода резко ограничивает то обстоятельство, что уголь добывается с повышенной влажностью в связи с применением орошения в забое (борьба с силикозом). В связи с данным обстоятельством использование пневматического метода влечет за собой неточностью разделения угля и минеральных примесей [3–5].

Материалы и методы исследования

Цель представленной работы заключалась в изучении теоретических основ практики применения оборудования для реализации гравитационного обогащения угольных шламов. В основу исследований были положены материалы, собранные коллективами отдела комплексного использования минерального сырья Института земной коры Сибирского отделения Российской академии

наук и Научно-производственной компании «Спирит».

Результаты исследования и их обсуждение

Проанализировав публикации, можно сделать вывод о том, что к числу важнейших тенденций поиска технологических решений по обогащению угольных шламов следует отнести развитие технологии их переработки преимущественно гравитационными методами. Исследованиями А. С. Кирнарского и С. А. Лупей [6–8] установлено, что обогащение угля по одному разделительному признаку – плотности разделения частиц – позволяет добиться максимальной эффективности гравитационного обогащения. Для переработки угольных шламов гравитационным методом обогащения наибольшее распространение получили отсадка, обогащение в тяжелых средах, технология винтовой сепарации, гидросайзеры, также известно применение концентрированных столов.

Обогащение углей в отсадочных машинах развивается многие десятилетия. На углеобогатительных фабриках традиционно после грохочения и отделения шлама крупный (10–12...50–80 мм) и мелкий (0,5...10–12 мм) уголь поступает на обогащение в отсадочных машинах. Отсадкой называется процесс разделения угольной смеси по плотности в восходящей и нисходящей струях воды (мокрая отсадка) или воздуха (пневматическая). Чаще всего на углеобогатительных фабриках России применяют мокрую отсадку, так как ее использование дает наилучшие качественно-количественные результаты.

В процессе длительного периода эксплуатации отсадочные машины для обогащения угля постоянно совершенствовались. Принципиальными схемами основных типов отсадочных машин являются следующие: с подвижным решето, поршневая, диафрагмовая, воздушно-золотниковая. Воздушно-золотниковая (беспоршневая) отсадочная машина наиболее совершенна в конструктивном и технологическом отношении для обогащения тонких классов угля. Область ее применения – шламы коксующихся и энергетических углей легкой, средней и трудной обогатимости круп-



ностью 0,15–3 мм^{6–8}.

В отсадочной машине пульсации воды в рабочем отделении создаются периодическим впуском сжатого воздуха в камеру посредством роторного или клапанного золотникового пульсатора. Машины сконструированы с верхним либо с нижним приводом золотниковых устройств, чтобы регулировать частоту подачи воздуха для получения восходящего и нисходящего потоков. При впуске воздуха рабочая среда поднимается вверх, а при выпуске опускается вниз. Воздушные камеры в последних конструкциях машин размещены непосредственно под рабочим решетом. Легкий продукт разгружается со сливом через борт установки, а тяжелый продукт и продукт промежуточной плотности – в щели, расположенные в конце каждого рабочего отделения.

Производительность отсадочной машины Q , т/ч, может быть определена по формуле

$$Q = qF,$$

где q – удельная нагрузка, т/ч·м²; F – рабочая площадь решет, м².

Удельная нагрузка отсадочных машин должна приниматься для крупного угля в размере 15–30 т/ч на квадратный метр сита, для мелкого угля – 15–25 т/ч на квадратный метр сита [9].

Оперативный контроль работы отсадочных машин может осуществляться непосредственно на рабочем месте оператором путем расслоения пробы материала в растворе хлористого цинка (фракционный анализ). Зольность продуктов обогащения зависит от режима работы отсадочных машин и величины засорения посторонними фракциями. Отсадочные машины при обогащении угольных шламов крупностью 0,15–3 мм чаще всего применяются для коксующихся и энергетических углей легкой, средней и трудной обогатимости, при этом плотность разделения составляет 1550–1920 кг/м³. Отсадочные машины характеризуются достаточно высокой производительностью и относительно низкой энергоемкостью. Существенным недостатком

отсадочных машин при обогащении угольных шламов является низкая эффективность обогащения тонких шламов [4].

Одно из ведущих мест в углеобогатительной отрасли занимает обогащение в тяжелых средах. Данный факт обусловлен высокой технологической эффективностью этого процесса. До недавнего времени тяжелосредное обогащение применялось в основном для углей крупных классов в высокопроизводительных барабанных сепараторах, которые представляют собой сосуды, заполненные суспензией и снабженные транспортными устройствами для раздельной выдачи продуктов обогащения. Производительность сепараторов может быть от 95 до 320 т/ч в зависимости от их типоразмеров, крупности исходного угля и его обогатимости.

В настоящее время обогащение в тяжелых средах находит все более широкое распространение и для обогащения труднообогатимых углей мелких классов. Для разделения мелкого угля по плотности в центробежном поле используют тяжелосредные гидроциклоны. Мелкий уголь вместе с суспензией (с определенной скоростью и под давлением) тангенциально вводят в гидроциклон. Плотность разделения угля в тяжелосредном гидроциклоне может быть равна или выше плотности суспензии, подаваемой в него вместе с углем. Частицы угля, плотность которых меньше плотности разделения, удаляются из гидроциклона вместе с суспензией через сливной патрубок, а частицы с большей плотностью разгружаются через песковую насадку гидроциклона. При этом процесс разделения угольной массы происходит с одновременным обессериванием угольной фракции [10].

В исследованиях А. Д. и Д. А. Полулях [11] отмечается широкий диапазон крупности в практике применения тяжелосредных гидроциклонов. Верхний предел крупности может достигать 30, 40 и даже 50 мм для крупнобаритных гидроциклонов (диаметром до 700 мм). Нижний предел крупности традици-

⁶ Бедрань Н.Г. Обогащение углей: учебник. М.: Недра, 1988. 206 с.

⁷ Беринберг З. Ш., Благов И. С., Борц М. А. [и др.]. Обогащение углей: справочник / под ред. И. С. Благова. М.: Недра, 1984. 614 с.

⁸ Обогащение углей методом отсадки // Studfile [Электронный ресурс]. URL: <https://studfile.net/preview/578102/page:3> (12.09.2022).



онно принимается равным 0,5–0,6 мм. Процесс обогащения в тяжелосредних гидроциклонах может быть осуществлен в одну (разделение на два продукта) либо в две стадии (разделение на три продукта). В последнем случае используются два последовательно установленных гидроциклона и суспензия двух плотностей. Обоснование количества стадий зависит от категории обогатимости угля и установленных требований к качеству продуктов обогащения. Условия разделения частиц обогащаемого угля в тяжелой среде определяется соотношением действующих на частицу сил – силы тяжести и подъемной (архимедовой) силы – с учетом сил сопротивления среды и механического взаимодействия частиц при их соприкосновении. Отмечено, что обогащение в тяжелосредних гидроциклонах может успешно проходить и для шламов крупностью 0,15...3–6 мм коксующихся углей трудной и очень трудной обогатимости, при этом плотность разделения варьирует в пределах 1400–1800 кг/м³ при вероятном отклонении плотности разделения 40–80 кг/м³. По данным литературных источников, этот показатель самый низкий из показателей распространенных в настоящее время способов реализации гравитационного обогащения угольных шламов.

К достоинствам применения технологии обогащения углей в тяжелосредних гидроциклонах можно отнести достаточно высокую точность разделения, эффективное обогащение углей трудной и очень трудной обогатимости, а также высокую точность регулирования плотности разделения. Недостатками же ее можно назвать относительно высокие эксплуатационные затраты (главным образом на электроэнергию и магнетит) и необходимость регенерации магнетитовой суспензии, усложняющую технологическую схему.

Гидросайзеры успешно используются за рубежом более 20 лет. Их применение связано в основном с обогащением зернистых шламов. Разделение минеральных частиц в аппаратах осуществляется по плотности и крупности в стесненных условиях в восходя-

щем потоке воды, создаваемом в рабочей зоне. Гидросайзеры нашли применение за рубежом для извлечения угольной мелочи из отвалов пустой породы, а также угольной мелочи, образуемой при высокомеханизированных методах угледобычи [5].

Исследование литературных источников также показало, что в отечественной практике и в странах бывшего Союза Советских Социалистических Республик имеется информация по анализу испытаний и определенного опыта использования данного вида гравитационного оборудования для обогащения угольных шламов⁹ [5, 12, 13]. Некоторые исследователи называют гидросайзер гидросепаратором [13] или сепаратором с качающейся постелью [12].

Рассмотрим процесс обогащения угольных шламов в гидросепараторе, представляющий собой цилиндрическую камеру, в нижнюю часть которой через распределительное устройство равномерно подается восходящий поток воды, а в верхнюю часть непрерывно загружается угольный шлам с содержанием от 40 до 60 % твердого по массе. По мере попадания частиц в восходящий поток воды происходит их сепарация по размерам и плотности. Фракции исходного материала, имеющие промежуточную плотность, в отличие от угольных и породных частиц удерживаются в потоке воды и формируют псевдооживленный слой на подложке породных фракций, который и поддерживает слой более легкой угольной фракции. При добавлении очередной порции исходного шлама угольная фракция уходит в сливной желоб гидросепаратора. Плотность взвешенного слоя породы промежуточной плотности поддерживается регулируемым сбросом ее избытка через специальный разгрузочный клапан аппарата [13].

Эффективность обогащения шламов в данном случае зависит от стабильной плотности псевдооживленного слоя, что, в свою очередь, обеспечивается постоянной скоростью и равномерностью подачи восходящего потока воды, а также контролем содержания твердого в этом слое. Принцип разделения угольных и породных частиц шлама в гидро-

⁹ На обогатительной фабрике «Распадская» запустили новое оборудование для лучшей переработки ценных марок угля // Издательский дом «Руда и металлы» [Электронный ресурс]. URL: <https://rudmet.net/news/11797> (12.09.2022).



сепараторе основан на осаждении частиц в воде под воздействие силы тяжести. Соотношение между массами частиц в конечном счете и обеспечивает сепарацию угольных и породных частиц с получением кондиционных продуктов обогащения.

На настоящий момент известно, что на отечественной обогатительной фабрике «Распадская» (Кемеровская область) Распадской угольной компании 16 сентября 2021 г. ввели в эксплуатацию новое оборудование – гидросайзер НТБС-3.0 для более эффективного обогащения угля мелкого класса¹⁰. Гидросайзер запустили в работу на третьей секции фабрики, где перерабатывают самые труднообогащаемые угли ценных для металлургов марок КС и К. Новое оборудование способствует обогащению мелкого угля размером 0,15–2 мм, позволяя получить дополнительный концентрат. Инновация уже позволила обогатителям фабрики «Распадская» увеличить выход концентрата на данной секции на 0,3 % в месяц.

Ранее на Центральной обогатительной фабрике «Чумаковская» (Донбасс) был установлен гидросайзер английской фирмы Stokes для обогащения зернистого шлама коксующегося угля [9]. В конце 2005 г. этот сепаратор был вырезан из технологического процесса из-за недостатков в работе, в основном из-за забивки пространства в месте подачи разрыхляющего вертикального потока воды. Тем не менее в течение некоторого времени эксплуатация гидросайзера обеспечивала извлечение качественного угольного концентрата [13].

В. А. Козлов и В. И. Новак [12], анализируя опыт работы гидросайзеров за рубежом, сделали вывод о том, что их достоинство заключается в возможности обогащения углей по низкой плотности разделения менее 1500 кг/м³, а также автоматического регулирования плотности разделения. К плюсам данного оборудования в числе прочего можно отнести относительно высокую удельную производительность. В числе недостатков можно назвать высокую стоимость оборудования, низкую эффективность обогащения углей

трудной обогатимости, потребность в чистой оборотной воде для обеспечения процесса обогащения, узкий класс крупности частиц, эффективно обогащаемых в одном аппарате. Погрешность работы гидросайзеров составляет 70–150 кг/м³ при плотности разделения 1500–2000 кг/м³. Худшие показатели относятся к обогащению более тонких шламов.

Концентрационные столы отлично зарекомендовали себя (с точки зрения технологии) при обогащении мелких классов высокосернистых коксовых углей. На данный момент в России для обогащения углей концентрационные столы не применяют, хотя в 50–60-е гг. прошлого века на ряде обогатительных фабрик Донбасса они использовались [14]. Тем не менее в зарубежной практике концентрационные столы используются в операции обогащения угольных шламов крупностью 0,2...3–6 мм с высоким содержанием серы для удаления пиритной формы серы. Погрешность работы концентрационных столов при обогащении коксующихся углей крупностью -3 мм при плотности разделения 1550–2000 кг/м³ составляет 100–150 кг/м³. Удельная производительность по концентрату – до 1 т/м²·ч. При всех технологических достоинствах концентрационные столы обладают следующими недостатками: эти аппараты, во-первых, чувствительны к колебаниям гранулометрического и фракционного составов исходного угольного продукта, во-вторых, сложны в наладке, эксплуатации и ремонте.

В настоящее время поиск и разработка экономичных методов, позволяющих составить альтернативу флотации при обогащении мелкого угля, является важной технологической и экономической задачей. В последнее десятилетие практически на всех углеобогачительных фабриках России, перерабатывающих коксующиеся угли, выполнена модернизация технологических схем с установкой для обогащения зернистых шламов крупностью 0,15...1–2 мм винтовых (спиральных) сепараторов. Это позволило значительно снизить нагрузку на флотационные отделения фабрик по твердому [3].

¹⁰ На обогатительной фабрике «Распадская» запустили новое оборудование для лучшей переработки ценных марок угля // Издательский дом «Руда и металлы» [Электронный ресурс]. URL: <https://rudmet.net/news/11797> (12.09.2022).



Винтовой сепаратор и винтовой шлюз – это аппараты для гравитационного метода обогащения полезных ископаемых, в которых так же, как и на столах, разделение минеральных частиц происходит в потоках воды малой толщины. Винтовые сепараторы представляют собой неподвижный винтовой желоб, закрученный вокруг вертикальной оси. Поперечное сечение желоба имеет определенную форму в зависимости от крупности обрабатываемого материала. Винтовые аппараты, как правило, комплектуются пульподелителем и пульпоприемником для удобства установки и эксплуатации.

Основными геометрическими параметрами винтовых аппаратов являются диаметр, форма поперечного сечения желоба, шаг, а также количество витков (рис. 1). Влияние указанных параметров винтовых аппаратов на процесс винтовой сепарации минерального сырья установлено экспериментально и подробно проанализировано в работах [15–17].

Принцип работы винтовых аппаратов заключается в следующем. Пульпа с содержанием твердого 15-40 % подается в верхнюю часть желоба. Поток пульпы на поверхности желоба винтового аппарата можно рассматривать как сложное движение двух дискретных потоков: несущей жидкости (воды) и твердой фазы. Разделение минералов происходит

за счет их разницы в плотностях в безнапорном движении пульпы по винтовому желобу. При этом происходит разрыхление, расслоение, перераспределение минеральных зерен по сечению потока на фракции, отличающиеся по плотности и крупности: тяжелые минералы сосредотачиваются у внутреннего борта сепаратора, а легкие – у наружного. Разгрузка продуктов обогащения производится через пульпоприемник, снабженный регулируемым отсекателем тяжелой фракции. Винтовой аппарат снабжен системой смывной воды, которая подается от внутреннего борта под низким давлением, регулируемым вентилем, или самотеком. Стекая по телу желоба, вода способствует очистке тяжелой фракции от примесей легких и граничных по крупности минеральных зерен. На рис. 2 проиллюстрировано распределение материала по поперечному сечению профиля желоба.

Винтовые сепараторы являются популярным гравитационным оборудованием в области обогащения угольных шламов. Закономерность и преимущества применения винтовых сепараторов базируются на низких эксплуатационных затратах при достаточно высокой эффективности разделения исходного угля на фракции различных плотностей, особенно при выделении высокозольных тяжелых фракций. Можно утверждать, что это

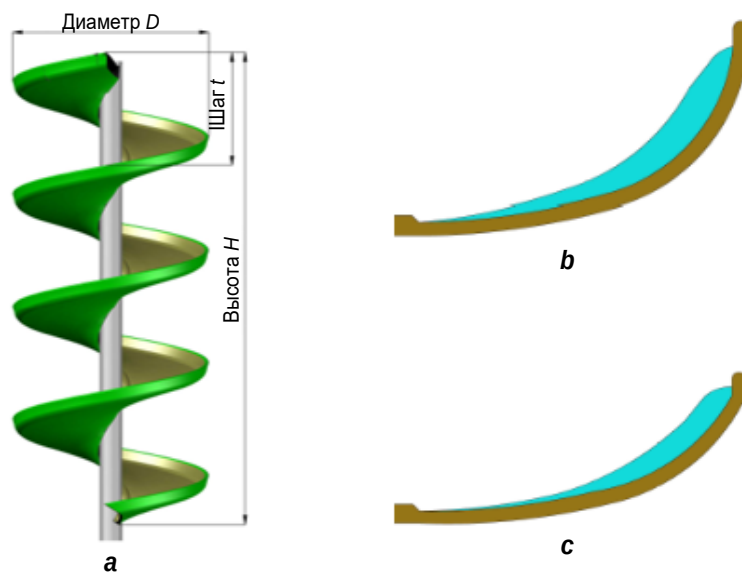


Рис. 1. Геометрические параметры винтового аппарата:

a – общий вид; b – вогнутое поперечное сечение; b – слабовогнутое поперечное сечение

Fig. 1. Geometric parameters of the spiral apparatus:

a – general view; b – concave cross section; c – weakly concave cross section



Рис. 2. Поперечное сечение желоба винтового сепаратора:
1 – частицы малого удельного веса; 2 – частицы большого удельного веса
Fig. 2. Cross-section of the spiral separator chute:
1 – particles of small specific gravity; 2 – particles of high specific gravity

наименее затратное оборудование, применяемое в гравитационных процессах обогащения. В нем отсутствуют подвижные части, приемники электроэнергии, не используются реагенты и другие расходные материалы, а процесс разделения происходит при самотеке материала по криволинейной поверхности в результате действия основных сил – гравитационной и центробежной. Нижний предел крупности питания винтовых сепараторов для угля находится диапазоне 0,1–0,15 мм, что дает возможность существенно снизить нагрузку на дорогостоящий и экологически напряженный процесс флотации. Кроме того, процесс винтовой сепарации полностью наблюдаем визуально, его регулирование может производиться без остановки работы аппарата. Использование винтовых аппаратов, бесспорно, относится к энергосберегающим и экологически чистым технологиям [3–5, 15].

В последние годы в России в процессах обогащения угольных зернистых шламов крупностью 0,15–0,2...1–3 мм успешно используются установки из классифицирующего гидроциклона и винтовых сепараторов на вновь строящихся и реконструируемых обогатительных фабриках: «Антоновская», «Кузбасская», «Печорская», «Березовская», «Беловская» и др. [3].

К недостаткам винтовых аппаратов при обогащении угольных шламов можно отнести

снижение эффективности обогащения частиц крупностью менее 0,15 мм, а также относительно невысокую удельную производительность на единицу занимаемой площади по питанию.

Единственным предприятием, которое занимается разработкой и производством винтовых аппаратов для обогащения минерального сырья, включая углесодержащее, в России является Научно-производственная компания «Спирит». В данной компании разработана конструкция винтовых шлюзов с профилем желоба, соответствующим эффективному обогащению угольных шламов.

При обогащении пробы хвостохранилища (гидроотвала) одной из углеобогатительных фабрик Восточной Сибири с применением винтового шлюза без дополнительных затрат на добычу получено качественное вторичное сырье [18, 19].

Исходный материал, зольность которого составила 49 %, по гранулометрической характеристике представлен на 90 % зернами менее 1 мм, причем около 40 % из них составляет глинисто-углистая масса частиц крупностью менее 0,04 мм с зольностью около 70 %. Мелкозернистая часть крупностью более 1 мм с зольностью 16,91 % пригодна для присадки к готовому угольному концентрату, выпускаемому на обогатительной фабрике. Исследование результатов ситового анализа предпо-



делило основные операции технологической схемы испытаний:

- классификацию исходного материала с выделением:

- зернистой части исходных шламов крупностью более 1 мм,

- класса -1+0,04 мм, являющегося питанием винтового шлюза,

- класса -0,04 мм, который выводится методом гидроциклонирования из процесса обогащения в отвал вследствие высокой его зольности;

- основную винтовую сепарацию класса -1+0,04 мм и перечистную – угольного концентрата;

- обезвоживание полученных продуктов обогащения.

В целом по предложенной технологии получено качественное вторичное топливо (класс +1 мм плюс концентрат винтового шлюза) с выходом 39,77 % и зольностью 21,38 %, что соответствует ТУ 12.36.225-91 «Угли ОАО «Востсибуголь» для сжигания на электростанциях», по которым обогащенные угли, получаемые на фабрике, должны иметь значение данного показателя не более 26,5 %. Кроме того, данная технология в процессе обогащения на винтовых шлюзах способствует обессериванию угольного продукта: массовая доля общей серы на сухое состояние топлива в исходном продукте – 1,18 %, в обогащенном угольном концентрате – 0,86 %. Тяжелая фракция винтового шлюза представляет собой породу с зольностью 76,17 % – отвальный продукт, из которого методом магнитной сепарации получен магнетитовый концентрат с содержанием

общего железа 62,1 %, пригодного для возврата на тяжелосреднее обогащение.

Приведенные данные технологических испытаний позволяют констатировать перспективность применения технологии винтовой сепарации при переработке угольных шламов в качестве сырья для получения товарного угольного концентрата на винтовых сепараторах отечественного производства.

Заключение

Результаты проведенной работы, обусловленной актуальностью проблемы переработки угольных шламов, в том числе из гидротвалов, по изучению научно-технической информации, несомненно, иллюстрируют факт того, что гравитационный метод их обогащения является результативным, ресурсосберегающим и экологически чистым. Выбор оборудования (а возможно, и сочетания различных приспособлений) для реализации указанного метода обогащения и топологии технологической схемы переработки угольных шламов определяется данными всестороннего изучения характеристики исходного материала (минералогический, ситовый, фракционный анализы и т. д.), а также требованиями к готовой товарной продукции. Автор статьи считает, что низкие эксплуатационные затраты при довольно высокой эффективности обогащения делают винтовые сепараторы наиболее перспективным видом оборудования для переработки угольных шламов, в том числе накопленных углесодержащих шламовых отходов, возникших в результате деятельности угледобывающих и углеперерабатывающих предприятий.

Список источников

1. Таразанов И. Итоги работы угольной промышленности России за 2012 год // Уголь. 2013. № 3. С. 78–90.

2. Шадрунова И. В., Зелинская Е. В., Волкова Н. А., Орехова Н. Н. Горнопромышленные отходы: ресурсный потенциал и технологии переработки (на примере Сибири и Урала) // Современные проблемы комплексной переработки труднообогатимых руд и техногенного сырья (Плаксинские чтения – 2017): материалы Междунар. науч. конф. (г. Красноярск, 12–15 сентября 2017 г.). Красноярск: Изд-во СФУ, 2017. С. 15–21.

3. Новак В. И., Козлов В. А. Обзор современных способов обогащения угольных шламов // Горный информационно-аналитический бюллетень (научно-

технический журнал). 2012. Отдельный выпуск № 5. Угледобыча: технологии, безопасность, переработка и обогащение. С. 130–138.

4. Белоусов В. А. Перспективные методы обогащения угольных шламов // Международный журнал прикладных и фундаментальных исследований. 2014. № 4. С. 15–17.

5. Сокур А. К. Обзор гравитационных технологий обогащения угольных шламов нефлотационной крупности // Збагачення корисних копалин: наук.-техн. зб. 2012. № 51. С. 126–136.

6. Кирнарский А. С. Улучшение гравитационной технологии обогащения хромистых руд // Збагачення



корисних копалин: наук.-техн. зб. 2011. № 46. С. 93–100.

7. Кирнарский А. С., Лупей С. А. Улучшение сепарационных характеристик гравитационных аппаратов на основе принципа однофункциональности // Збагачення корисних копалин: наук.-техн. зб. 2011. № 45. С. 71–78.

8. Кирнарский А. С. Принцип однофункциональности разделительных процессов при обогащении каменного угля // Уголь. 2012. № 5. С. 94–96.

9. Самыгин М. А., Золотко А. А., Починок В. В. Отсадка. М.: Недра, 1976. 319 с.

10. Зарубин Л. С., Иофа М. Б. Технология глубокого обогащения и обессеривания угля в тяжелосредних гидроциклонах за рубежом: обзор. М.: ЦНИИУголь, 1980. 29 с.

11. Полулях А. Д., Полулях Д. А. Применение тяжелосредних гидроциклонов для обогащения угля // Збагачення корисних копалин: наук.-техн. зб. 2011. № 47. С. 116–126.

12. Козлов В. А., Новак В. И. Развитие метода качающейся постели в обогащении угольных шламов // Горный информационно-аналитический бюллетень (научно-технический журнал). 2010. № 6. С. 99–106.

13. Байченко А. А., Евменова Г. Л. Утилизация угольных шламов Кузбасса из наружных отстойников // Вестник Кузбасского государственного технического университета. 2005. № 4-1. С. 57–60.

14. Букин С. Л., Корчевский А. Н., Шолда Р. А. Комплекс обогащения угольных шламов на основе концентративного стола // Збагачення корисних копалин: наук.-техн. зб. 2010. № 43. С. 54–61.

15. Иванов В. Д., Прокопьев С. А. Винтовые аппараты для обогащения руд и песков в России. М.: Дакси, 2000. 239 с.

16. Аникин М. Ф., Иванов В. Д., Певзнер М. Л. Винтовые аппараты для обогащения руд. М.: Недра, 1970. 181 с.

17. Яшин А. В., Аникин М. Ф., Скрипко В. А. Сепараторщик винтовых аппаратов. М.: Недра, 1984. 102 с.

18. Прокопьев С. А., Пономарева А. М., Болотин М. Л. Переработка техногенного сырья углеобогадательной фабрики // Экологические проблемы и новые технологии комплексной переработки минерального сырья (Плаксинские чтения – 2002): материалы Международ. совещ. (г. Чита, 16–19 сентября 2002 г.). Чита: ПКЦ-Альтекс, 2002. С. 79–82.

19. Турецкая Н. Ю., Прокопьев С. А., Прокопьев Е. С. Разработка эффективной низкзатратной технологии получения угольного концентрата и железосодержащего продукта из шламов илов гидроотвала Касьяновской ОФ // XII Конгресс обогатителей стран СНГ (г. Москва, 25–27 февраля 2019 г.). М.: Изд-во МИСиС, 2019. С. 205–209.

References

1. Tarazanov I. Performance results of Russian coal industry in 2012. *Ugol' = Russian Coal Journal*. 2013;3: 78-90. (In Russ.).

2. Shadrunkova I. V., Zelinskaya E. V., Volkova N. A., Orekhova N. N. Mining waste: resource potential and processing technologies (on the example of Siberia and the Urals). In: *Sovremennye problemy kompleksnoi pererabotki trudnoobogatimyykh rud i tekhnogennoho syr'ya (Plaksinskie chteniya – 2017): materialy Mezhdunar. nauch. konf. = Modern problems of complex processing of refractory ores and technogenic raw materials (Plaksinsky Readings – 2017): materials of the International scientific conference*. 12–15 September 2017, Krasnoyarsk. Krasnoyarsk: Siberian Federal University; 2017, p. 15–21. (In Russ.).

3. Novak V. I., Kozlov V. A. Review of modern coal sludge concentration methods. *Gornyi informatsionno-analiticheskii byulleten' (nauchno-tekhnicheskii zhurnal) = Mining informational and analytical bulletin (scientific and technical journal)*. 2012;5:130-138. (In Russ.).

4. Belousov V. A. Perspective methods of enrichment of coal slime. *Mezhdunarodnyi zhurnal prikladnykh i fundamental'nykh issledovaniy*. 2014;4:15-17. (In Russ.).

5. Sokur A. K. Review of gravitational concentration technologies for coal slimes of non-flotation size. *Obogashchenie poleznykh iskopaemykh: nauch.-tekhn. sb.* 2012;51:126-136. (In Ukrainian).

6. Kirnarskii A. S. Improvement of gravitational technology of chromium ore beneficiation. *Obogashchenie poleznykh iskopaemykh: nauch.-tekhn. sb.* 2011;46:93-100. (In Ukrainian).

7. Kirnarskii A. S., Lupei S. A. Improvement of separation characteristics of gravitational apparatuses based on the single functionality principle. *Obogashchenie poleznykh iskopaemykh: nauch.-tekhn. sb.* 2011;45:71-78. (In Ukrainian).

8. Kirnarskii A. S. The principle of single-functionality of separation processes under hard coal beneficiation. *Ugol' = Russian Coal Journal*. 2012;5:94-96. (In Russ.).

9. Samygin M. A., Zolotko A. A., Pochinok V. V. *Jigging*. Moscow: Nedra; 1976. 319 p. (In Russ.).

10. Zarubin L. S., Iofa M. B. *Foreign technology of coal deep enrichment and desulfurization in heavy-medium hydrocyclones abroad: review*. Moscow: Central Research Institute of Economics and Scientific and Technical Information of the Coal Industry; 1980. 29 p. (In Russ.).

11. Polulyakh A. D., Polulyakh D. A. Use of heavy-medium hydrocyclones for coal beneficiation. *Obogashchenie poleznykh iskopaemykh: nauch.-tekhn. sb.* 2011;47:116-126.

12. Kozlov V. A., Novak V. I. The development of the method of shaken bed when concentrating coal tailings. *Gornyi informatsionno-analiticheskii byulleten' (nauchno-tekhnicheskii zhurnal) = Mining informational and analytical bulletin (scientific and technical journal)*. 2010;6:99-106. (In Russ.).

13. Baichenko A. A., Evmenova G. L. Recycling of Kuzbass coal sludge from external settling ponds. *Vestnik Kuzbasskogo gosudarstvennogo tekhnicheskogo universiteta = Bulletin of the Kuzbass State Technical University*. 2005;4-1:57-60. (In Russ.).

14. Bukin S. L., Korchevskii A. N., Sholda R. A. Coal



slime enrichment complex based on a concentration table. *Obogashchenie poleznykh iskopayemykh: nauch.-tekhn. sb.* 2010;43:54-61. (In Russ.).

15. Ivanov V. D., Prokop'ev S. A. *Spiral apparatuses for ore and sand enrichment in Russia*. Moscow: Daksi; 2000. 239 p. (In Russ.).

16. Anikin M. F., Ivanov V. D., Pevzner M. L. *Spiral apparatuses for ore concentration*. Moscow: Nedra; 1970. 181 p. (In Russ.).

17. Yashin A. V., Anikin M. F., Skripko V. A. *Separator of spiral apparatuses*. Moscow: Nedra; 1984. 102 p. (In Russ.).

18. Prokop'ev S. A., Ponomareva A. M., Bolotin M. L. Processing of technogenic raw materials of a coal washing plant. In: *Ekologicheskie problemy i novye tekhnologii kompleksnoi pererabotki mineral'nogo syr'ya* (Plaksinskie cht-

eniya – 2002): *materialy Mezhdunar. soveshch. = Environmental problems and new technologies for the complex processing of mineral raw materials (Plaksinsky Readings – 2002): materials of the International meeting*. 16–19 September 2002, Chita. Chita: PKTs-Al'teks; 2002, p. 79–82. (In Russ.).

19. Turetskaya N. Yu., Prokop'ev S. A., Prokop'ev E. S. Development of an effective low-cost technology for obtaining coal concentrate and iron-containing product from the silt sludge of the Kasyanovskaya Concentrator hydraulic dump. In: *XII Kongress obogatitelei stran SNG = 12th CIS Congress of the Mineral Processing Engineers*. 25–27 February 2019, Moscow. Moscow: National University of Science and Technology (MISIS); 2019, p. 205–209. (In Russ.).

Информация об авторе / Information about the author



Прокопьев Сергей Амперович,

кандидат технических наук,
начальник отдела комплексного использования минерального сырья,
Институт земной коры, СО РАН,
г. Иркутск, Россия,
генеральный директор,
ООО «Научно-производственная компания «Спирит»»,
г. Иркутск, Россия,
psa@spirit-irk.ru.

Sergey A. Prokopiev,

Cand. Sci. (Eng.),
Head of the Department of Integrated Use of Mineral Raw Materials,
Institute of the Earth's Crust SB RAS,
Irkutsk, Russia,
Managing Director,
Research and Production Company Spirit, LLC,
Irkutsk, Russia,
psa@spirit-irk.ru.

Вклад автора / Contribution of the author

Автор выполнил анализ литературы, сбор статистических данных, формулировку научных гипотез, подготовил рукопись к печати.

The author analyzed the literature, collected statistical data, formulated scientific hypotheses 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 16.09.2022; одобрена после рецензирования 21.10.2022; принята к публикации 25.11.2022.

The article was submitted 16.09.2022; approved after reviewing 21.10.2022; accepted for publication 25.11.2022.



Научная статья

УДК 552.574

<https://doi.org/10.21285/2686-9993-2022-45-4-469-480>



Применение технологии винтовой сепарации при переработке угольных шламов

Надежда Павловна Соловеевко^a, Никита Михайлович Болотин^b

^{a,b}Институт земной коры СО РАН, г. Иркутск, Россия

^{a,b}ООО «Научно-производственная компания «Спирит»», г. Иркутск, Россия

Автор, ответственный за переписку: Соловеевко Надежда Павловна, snp@spirit-irk.ru

Резюме. Целью работы являлся анализ современного состояния проблемы технологии обогащения угольных шламов углеобогащательных фабрик, сравнение результатов переработки шламов угольных гидроотвалов на различных видах обогатительного оборудования, а также определение рекомендаций по применению метода винтовой сепарации при обогащении угольных шламов. К основным методам проведенного исследования можно отнести обобщение и анализ научно-технической информации, изучение результатов технологических испытаний по винтовой сепарации. Проблема обогащения шламов актуальна в связи с увеличением содержания тонких классов в добываемых углях и, следовательно, в угольных шламах. В реальности большинство шламов представляет собой топливо для энергетики. В результате работы проведен анализ экспериментальной части исследований, установлена эффективность разделения угля от породной фракции с использованием технологии винтовой сепарации угольных шламов. Определена необходимость предварительной классификации исходного материала перед винтовой сепарацией. Выявлено, что винтовые шламовые сепараторы по сравнению с винтовыми минеральными сепараторами имеют ряд технологических преимуществ, обусловленных более широким диапазоном крупности обогащаемого материала. Анализ выполненных испытаний позволил установить перспективность применения технологии винтовой сепарации при переработке угольных шламов. Авторами даны рекомендации по использованию винтовых аппаратов ООО «Научно-производственная компания «Спирит»» для обогащения шламовых продуктов (текущие хвосты, шламовый продукт гидроотвала) производственного участка «Обогатительная фабрика» филиала «Разрез «Черемховуголь»» ООО «Компания «Востсибуголь»».

Ключевые слова: угольные шламы, практика технологии винтовой сепарации, винтовые сепараторы, винтовые шлюзы, вторичный угольный концентрат

Финансирование: Работы выполнены в рамках комплексного научно-технического проекта Министерства науки и высшего образования Российской Федерации № 075-15-2022-1192 «Переработка хвостов угольных обогатительных фабрик с целью получения товарного угольного концентрата» при поддержке комплексной научно-технической программы полного инновационного цикла «Разработка и внедрение комплекса технологий в областях разведки и добычи твердых полезных ископаемых, обеспечения промышленной безопасности, биоремедиации, создания новых продуктов глубокой переработки угольного сырья при последовательном снижении экологической нагрузки на окружающую среду и рисков для жизни населения», утвержденной Распоряжением Правительства Российской Федерации № 1144-р от 11 мая 2022 г.

Для цитирования: Соловеевко Н. П., Болотин Н. М. Применение технологии винтовой сепарации при переработке угольных шламов // Науки о Земле и недропользование. 2022. Т. 45. № 4. С. 469–480. <https://doi.org/10.21285/2686-9993-2022-45-4-469-480>.

Original article

Application of spiral separation technology in coal sludge processing

Nadezhda P. Soloveenko^a, Nikita M. Bolotin^b

^{a,b}Institute of the Earth's Crust SB RAS, Irkutsk, Russia

^{a,b}Research and Production Company Spirit, LLC, Irkutsk, Russia

Corresponding author: Nadezhda P. Soloveenko, snp@spirit-irk.ru

Abstract. The purpose of the study is to analyze the current state of the problem concerning the concentration technology of wash house coal sludge, comparison of the results of sludge dump coal processing on various types of processing equipment as well as formulation of recommendations for spiral separation method application for coal sludge enrichment.



The main research methods include generalization and analysis of scientific and technical information, study of the results of technological tests on spiral separation. The problem of sludge concentration is relevant due to the increase in the content of fine classes in mined coal and, consequently, in coal sludge. In real practice most of the sludge is fuel for energy. Having analyzed the experimental part of the research, the authors established the efficiency of coal and rock fraction separation using the technology of coal sludge spiral separation. The need for preliminary classification of the source material before spiral separation is determined. It is found out that spiral sludge separators have a number of technological advantages as compared to spiral mineral separators, due to a wider range of enriched material fineness. The analysis of the performed tests made it possible to establish the application prospects of the spiral separation technology in coal sludge processing. The recommendations are given on the use of spiral separators manufactured by the Research and Production Company Spirit, LLC for the enrichment of sludge products including tailings, dump sludge of the work site of the Wash House of the Branch Open Pit Cherekhovugol of Vostsibugol Company, LLC.

Keywords: coal sludge, practice of spiral separation technology, spiral separators, spiral chutes, secondary coal concentrate

Funding: The study was performed in the frameworks of the integrated scientific and technical program of the Ministry of Science and Higher Education of the Russian Federation No. 075-15-2022-1192 "Processing of tailings of coal preparation plants to obtain commercial coal concentrate". The research was also supported by a comprehensive scientific and technical program of the full innovation cycle "Development and implementation of a set of technologies in the field of exploration and production of solid minerals, ensuring industrial safety, bio-remediation, creation of new products of coal raw material deep processing with a consistent reduction in the environmental load and risks to the population life" approved by the Decree of the Government of the Russian Federation No. 1144-p of May 11, 2022.

For citation: Soloveenko N. P., Bolotin N. M. Application of spiral separation technology in coal sludge processing. *Nauki o Zemle i nedropol'zovanie = Earth sciences and subsoil use*. 2022;45(4):469-480. (In Russ.). <https://doi.org/10.21285/2686-9993-2022-45-4-469-480>.

Введение

Повышение качества добываемого угля за счет удаления из него высокозольной угольной породы в отечественной практике и за рубежом осуществляется на обогатительных фабриках. Об этом пишут в своей статье В. В. Кочетов и другие: «Большинство из них имеют технологию, включающую предварительное разделение угля на машинные классы крупности более 13 мм, 0,5–13 мм и менее 0,5 мм и их раздельное обогащение с применением, соответственно, тяжелых сред (в магнетитовой суспензии), гидравлической отсадки и флотации. На отдельных фабриках для крупного класса также используются отсадочные машины, а на некоторых – отделение неклассифицированного угля крупностью до 100 мм. Фабрики, перерабатывающие угли для энергетики, используют либо тяжелые среды, либо отсадочные машины для класса крупности более 13 мм, где сухой отсев не обогащается [1].

Особую проблему всех углеобогачительных фабрик представляет обогащение шламов, к которым относят угольные и породные частицы крупностью менее 0,5–1 и даже 2 мм. Шламов крупностью менее 0,5 мм в зависимости от физико-механических свойств угля и вмещающих пород, а также технологии добычи в исходном угле содержится от 5 до 25 %, а в процессах мокрого обогащения дроблением, истиранием и размоканием их

дополнительно образуется до 8 %. В итоге доля шламов с зольностью 35–45 %, подлежащих обогащению, составляет до трети от общей массы переработанного угля.

Особенности таких гравитационных процессов сепарации, как тяжелые среды и отсадочные машины, не позволяют их эффективно употреблять для обогащения шламистого сырья. Для этих целей применяют тяжелосредные гидроциклоны, концентрационные столы, винтовые сепараторы (винтовые минеральные сепараторы), винтовые шлюзы (винтовые шламовые сепараторы) и другие устройства, использующие гравитационные принципы сепарации в сочетании с эффектами, возникающими при взаимодействии взвешенного потока с твердой поверхностью. Рациональный диапазон крупности для них – 0,2–3 мм [2, 3].

Для угольных шламов крупностью менее 0,5 мм пригодна пенная флотация, которая особенно чувствительна к верхнему пределу крупности. Если он превышает 0,5 мм, то подъемной силы воздушных пузырьков недостаточно для извлечения в пенный продукт гидрофобных угольных частиц и они остаются в камерном продукте флотации, то есть в отходах. Этим и обусловлен нижний предел машинного класса для отсадочных машин в типовой схеме обогащения угля, но, исходя из сепарационных возможностей процесса гидра-



влической отсадки, следует его увеличивать до 3 мм^{1,2}» [4].

В результате переработки угля на обогатительных фабриках в хвостохранилищах (гидроотвалах) накапливаются текущие и отвальные шламовые отходы [4–6], представляющие собой техногенные образования, негативно влияющие на окружающую среду. Известно, что вовлечение в производство сырья техногенных образований позволяет решать проблемы ресурсосбережения, охраны недр, рационального недропользования и защиты окружающей среды, кроме того, это важная сторона экономики России [7]. По определению К. Н. Трубецкого, техногенными месторождениями являются техногенные образования, которые по количеству и качеству содержащегося минерального сырья пригодны для эффективного использования в сфере материального производства в настоящее время и в будущем. В связи с этим для угледобывающей отрасли весьма актуальными являются вопросы, связанные с использованием техногенного сырья, то есть уже накопленных минеральных образований на поверхности. Особое место среди таковых занимают хвостохранилища (гидроотвалы, шламоотстойники) углеобогачительных фабрик, которые относятся к первой группе техногенных месторождений углесодержащего сырья [8]. Использование отходов производства считается важной задачей угольной промышленности.

Основными критериями выбора в пользу поиска путей для переработки отходов производств являются, безусловно, экологический и экономический. Только в случае превышения прогнозируемых доходов от использования техногенных ресурсов над затратами на разработку и внедрение технологических решений с учетом экологических преимуществ возможно ожидать крупномасштабного процесса рециклинга отходов. В связи с этим на первое место выдвигаются задачи разработки технологических решений и схем для переработки сложного техногенного ресурса [9].

Цель представленного исследования заключалась в анализе научно-технической информации о возможности обогащения уголь-

ных шламов по технологии винтовой сепарации, а также разработке рекомендаций по применению метода винтовой сепарации при обогащении угольных шламов.

Материалы и методы исследования

В ходе работы авторами было проведено обобщение научно-технической информации, произведен ее анализ. Вещественный состав материала был изучен при помощи гранулометрического и минералогического анализов, химический состав определен атомно-эмиссионным методом с индуктивно-связанной плазмой (АО «Иргиредмет»). Зольность топлива установлена методом ускоренного озоления (ООО «Инженерный центр «Иркутскэнерго»).

Результаты исследования и их обсуждение

При выборе рационального метода переработки материала гидроотвалов необходимо учитывать физико-химические свойства твердой фазы и определять его приоритетные зоны для переработки. Результаты ситового и фракционного анализов дают возможность прогнозировать способ и технологию процессов обогащения.

Особенностями технологии переработки извлекаемого материала из гидроотвалов, в отличие от технологии, использующейся на обогатительных фабриках, является их высокая зольность, высокое содержание частиц менее 0,05 мм, колебания зольности и гранулометрического состава извлекаемого продукта. Разработкой рациональных технологических и технических решений для разрешения проблемы обогащения угольных шламов занимаются исследовательские институты и предприятия, а также специалисты обогатительных фабрик.

Многими исследователями сделано заключение о том, что для угольного шлама крупностью 2–3 мм имеют преимущество винтовые сепараторы. В данной статье приводятся результаты исследований по подготовке и обогащению угольного шлама с применением технологии винтовой сепарации.

¹ Обогащение углей: справочник / ред. И. С. Благов. М.: Недра, 1984.

² Классен В. И. Элементы теории флотации каменных углей: учеб. пособие. М.: Углетехиздат, 1953. 204 с.



На Печорской центральной обогатительной фабрике (Республики Коми, Россия) особое внимание уделено вопросу классификации угольного шлама. Проектом данного предприятия разработано несколько вариантов схем с установкой двухстадиальной классификации в гидроциклонах диаметром 1000 и 360 мм, а также с применением двухстадиальной классификации в гидравлических аппаратах. Теоретические и экспериментальные исследования рассматриваемых схем выявили ряд существенных недостатков, например, невозможность обогащения по плотности, что не позволило внедрить технологии в производство. В продолжение исследований установлена перспективность и в последующем внедрена классификация шламов в гидроциклонах диаметром 500 мм, слив которых поступает на флотацию, а сгущенный продукт – на обогащение в винтовые сепараторы LD-7 (Австралия), отходы обезвоживаются на высокочастотном грохоте, концентрат – на двух последовательно установленных дуговых ситах. В результате внедрения технологии обогащения зернистого шлама 0,1–1,5 мм в винтовых сепараторах в два-три раза снизилась нагрузка на тяжелосредние гидроциклоны, что позволило стабилизировать работу тяжелосреднего комплекса и сократить расход магнетита с продуктами обогащения с 4,5 до 0,92 кг/т.

Снижение крупности питания флотации с 0–0,5 до 0–0,2 мм обеспечило уменьшение нагрузки по крупному шламу, что позволило в два раза сократить расход реагентов и улучшить экологическую обстановку в районе предприятия [10].

На кафедре обогащения полезных ископаемых Национального горного университета г. Днепра (Украина) коллективом под руковод-

ством А. С. Кирнарского изучено влияние условий подготовки исходного продукта на результаты винтовой сепарации угольных шламов, а также проведена их предварительная классификация в гидроциклонах, спиральных классификаторах и на грохотах. В результате упомянутым коллективом «разработана стендовая установка, на которой детально изучался этот вопрос. Исходный угольный шлам загружался в усреднительный зумпф, где он перемешивался и разбавлялся водой до нужного содержания твердого, а затем центробежным насосом перекачивался непосредственно на винтовой сепаратор, там подвергался обогащению в замкнутом цикле с получением двух продуктов: концентрата и отходов. Опробование последних осуществлялось непрерывно. Согласно второму и третьему технологическим режимам, исходный угольный шлам классифицировался в гидроциклонах и спиральном классификаторе соответственно. В рамках четвертого технологического режима проводилось распределение на ситах, при этом зернистая часть после мокрого рассева загружалась в усреднительный зумпф и подвергалась мокрой винтовой сепарации по первому варианту в замкнутом цикле. Данные винтовой сепарации угольных шламов, подвергнутых предварительной гидроклассификации по классу -200 мкм, сведены в таблицу» [11]. Указанные данные представлены в табл. 1.

Результаты проведенных экспериментов свидетельствуют о необходимости предварительной классификации исходного материала перед винтовой сепарацией. Наибольший эффект достигнут при применении гидроциклона и высокочастотных сит: содержание золы снижено вдвое при выходе обогащенного концентрата около 80 %.

Таблица 1. Результаты винтовой сепарации в зависимости от способа подготовки питания [11]
Table 1. Results of spiral separation depending on the feed preparation method [11]

Наименование продукта	Без классификации		Спиральный классификатор		Гидроциклон		Сита	
	Выход, %	Зола, %	Выход, %	Зола, %	Выход, %	Зола, %	Выход, %	Зола, %
Концентрат	87,14	20	75,75	15,37	85,41	12,41	79,79	11,12
Хвосты	12,86	55	24,25	52,65	14,59	78	20,8	62,82
Исходный продукт	100	24,5	100	24,41	100	22	100	21,57



На предприятиях ЗАО «Донецкугледобывание-Сервис» (Ростовская область, Россия) изучение и внедрение технологии винтовой сепарации было начато в прошлом столетии [4]. Здесь были выполнены испытания винтовых шлюзов ШВ2-1000, изготовленных на Усольском заводе горного оборудования (Иркутская область, Россия), принципиальное отличие которых от винтовых сепараторов заключается в том, что они имеют прямой профиль днища с углом наклона 5° , что обеспечивает более благоприятные условия концентрации мелких частиц по сравнению с винтовыми сепараторами с эллиптическим профилем днища. Шлюзы испытывались на обогатительных фабриках «Добропольская», «Украина» и «Узловская», расположенных в Донбассе.

Как было упомянуто выше, коллективом В. В. Кочетова на обогатительной фабрике «Добропольская» испытывались два таких шлюза по одностадиальной схеме без предварительного обесшламливания. Данными учеными было установлено, что «наиболее эффективное обогащение угольного шлама происходит при концентрации твердой фазы в исходной пульпе 400–500 г/л с нагрузкой по твердому на один желоб 3–4 т/ч. В результате зольность шлама снижается на 6–10 % при зольности отходов 75–85 %. Анализ гранулометрических и фракционных составов продуктов обогащения показал, что в отходах практически отсутствует легкая (угольная) фракция плотностью менее 1500 кг/м³, промежуточной фракции плотностью 1500–1800 кг/м³ содержится 1,2–5,5 % и более 90 % высокозольной фракции плотностью более 1800 кг/м³. Наибольшую эффективность сепарации имеет класс крупности 0,16–1 мм. Класс крупности менее 0,08 мм в отходы извлекается всего на 10–15 %, что позволило сделать заключение о том, что нижним пределом крупности обогащения угля в винтовых шлюзах является 0,05–0,08 мм.

Испытания этих шлюзов в двухстадиальной схеме показали, что из шламов с зольностью 27,5–41,2 % при нагрузке на шлюз 5–10 т/ч с концентрацией твердого 430–540 г/л возможно получение (после обесшламливания) концентратов с зольностью 6,1–11,7 % при зольности отходов 73,4–78,1 %.

При промышленных испытаниях этих шлюзов на обогатительной фабрике «Узловская» из отходов пенной сепарации угольных шламов с зольностью 36–66,6 % при сепарации в одну стадию удалось дополнительно получить концентраты с зольностью 26–33,9 % при зольности отходов 83–85,6 %.

На обогатительной фабрике «Украина» с помощью винтовых шлюзов зольность шламов снизилась на 6–10 %, а на обогатительной фабрике «Калининская» из отходов флотации дополнительно извлекается 20–30 % шламов с зольностью до 40 % при получении отходов сепарации с зольностью до 75–78 %.

На обогатительной фабрике «Узловская» для зернистых шламов, перерабатываемых пенной сепарацией, были установлены шесть винтовых шлюзов ШВ2-1000 и при нагрузке на один шлюз 6 т/ч при массовой доле твердого в питании 32–42 % в одну стадию был получен концентрат зольностью 10,5–15,5 %, промежуточный продукт зольностью 30–45 % и отходы с зольностью более 78 %. Результаты этих испытаний легли в основу создания промышленных образцов винтовых шлюзов, конструкция которых адаптирована к обогащению угольных шламов.

Кроме того, на обогатительной фабрике «Добропольская» проверена принципиальная возможность обогащения на винтовых шлюзах продуктов крупностью до 13 мм. При переобогащении промежуточного продукта отсадочной машины с зольностью 45–48 % были получены продукты сепарации с зольностями 24 и 72 %, а при переобогащении отходов отсадки с зольностью 74–75 % – продукты с зольностями 49 и 79–81 %.

Анализ выполненных испытаний позволил установить перспективность применения на углеобогажительных фабриках винтовых шлюзов, основными преимуществами которых по сравнению с винтовыми сепараторами с эллиптической формой желоба являются:

- снижение в два-три раза нижнего предела крупности обогащаемого материала даже без предварительной дешламации исходного продукта;

- более низкие эксплуатационные затраты, обусловленные изготовлением и заменой резинового покрытия для желобов с линейным



профилем днища;

- получение более чистых отходов по сравнению с винтовыми сепараторами;
- эффективность обогащения материалов крупностью до 13 мм при линейном профиле поперечного сечения желоба, представленного отрезками двух-трех прямых с переменными углами наклона» [4].

В Лаборатории обогащения ООО «Научно-производственная компания «Спирит»», занимающейся в числе прочего разработкой и производством винтовых аппаратов, проведен ряд технологических исследований по выявлению возможности получения вторичного топлива из накопленных угольных шламов производственного участка «Обогатительная фабрика» компании «Разрез «Черемховуголь»» (Иркутская область, Россия).

Объектом первых тестовых исследований явилась проба, отобранная с гидроотвала с зольностью исходного материала 49 %. По гранулометрической характеристике материал представлен на 90 % зернами менее 1 мм, причем около 40 % составляет глинисто-углистая суспензия крупностью -0,04 мм с зольностью около 70 %.

Разработанная схема обогащения включала следующие операции:

- двухстадийную классификацию исходного материала с выделением класса +1 мм, приемлемого по зольности для присадки к готовому продукту обогащения, класса -1+0,04 мм, являющегося питанием винтового шлюза марки ШВ-750, и класса -0,04 мм, который выводился из процесса обогащения в отвал вследствие его высокой зольности;
- основную и контрольную винтовую сепарацию промежуточного класса (-1+0,04 мм);

– обезвоживание полученных продуктов обогащения.

Показатели обогащения угольных шламов представлены в табл. 2. Эксперименты по винтовой сепарации угольных продуктов проводились на лабораторной установке, принципиальная схема работы винтового сепаратора показана на рис. 1.

Анализ полученных показателей свидетельствует о достаточно высокой степени разделения по зольности на винтовом шлюзе мелких классов углей. Зольность угольного концентрата составляет 22,66 %. Тяжелая фракция винтового шлюза представляет собой породу при 76,17 % зольности [12].

В целом по представленной технологии получено вторичное топливо (класс +1 мм и концентрат шлюза) с выходом 39,77 % и зольностью 21,38 %, что по качеству соответствует получаемому на фабрике концентрату марки ДСШ ($d = 0-13$ мм) по ТУ 12.36.225-91 «Угли ОАО «Востсибуголь» для сжигания на электростанциях». Кроме того, данная технология позволяет провести процесс обогащения и по сере: массовая доля общей серы на сухое состояние топлива в исходном продукте – 1,18 %, в обогащенном угольном концентрате – 0,86 %.

Последующие технологические испытания в тестовом режиме подтвердили возможность использования технологии винтовой сепарации при переработке не только гидроотвала, но и текущих хвостов обогатительной фабрики.

Объектом технологических испытаний явились две пробы: проба № 1, отобранная с гидроотвала обогатительной фабрики с зольностью 53,3 %, и проба № 2, отобранная из накопленных текущих хвостов с зольностью

Таблица 2. Показатели обогащения угольных шламов
Table 2. Indicators of coal sludge concentration

Наименование продукта	Выход, %	Зольность, %	Распределение, %
Класс +1 мм	9,21	16,91	3,2
Угольный концентрат винтового шлюза	30,56	22,66	14,22
Итого: обогащенный угольный продукт	39,77	21,38	17,42
Порода	10,69	76,17	16,72
Иловая фракция (класс -0,04 мм)	35,48	67,22	48,98
Ил обезвоживающего грохота	14,06	58,46	16,88
Итого: отвальные продукты	60,23	66,76	82,58
Исходный продукт: шламы гидроотвала	100	48,69	100



49,7 %. С учетом распределения зольности по классам крупности проведена компоновка схемы обогащения каждого продукта с вклю-

чением операций классификации, винтовой сепарации и обезвоживания полученных продуктов обогащения (рис. 2, 3)³ [13–15].

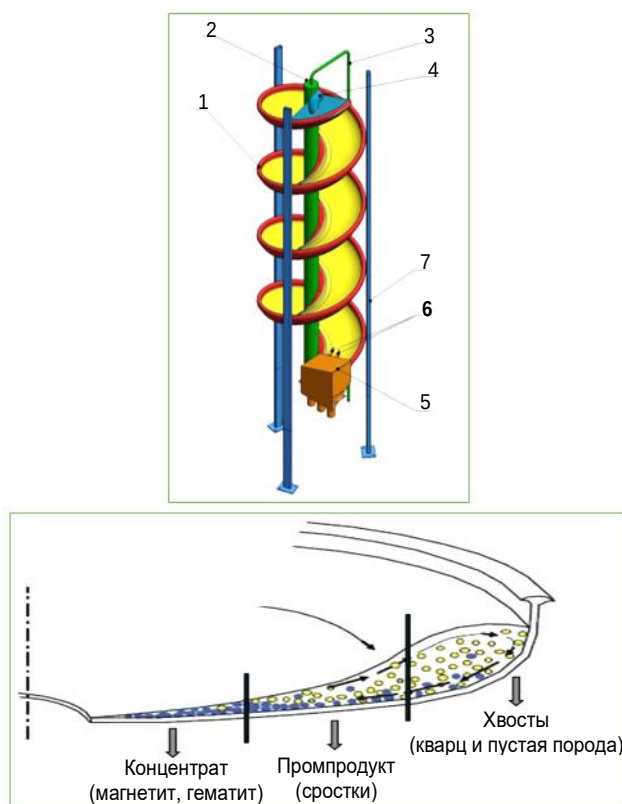


Рис. 1. Принципиальная схема работы винтового сепаратора:

1 – винтовой желоб; 2 – трубы смывной воды; 3 – трубы для подвода воды; 4 – узел загрузки;
5 – приемник продуктов обогащения; 6 – отсекатели продуктов обогащения; 7 – стойки

Fig. 1. Schematic diagram of spiral separator operation:

1 – spiral chute; 2 – wash water pipes; 3 – water supplying pipes; 4 – loading unit;
5 – receiver of enrichment products; 6 – separators of enrichment products; 7 – struts

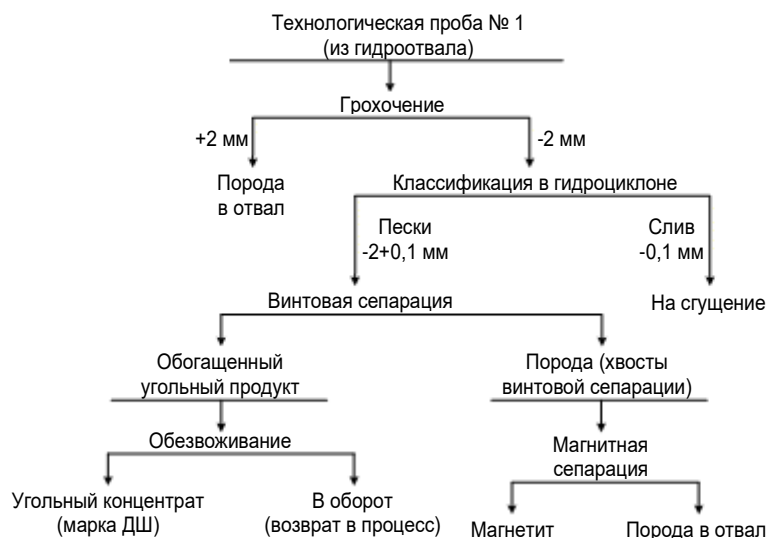


Рис. 2. Принципиальная схема обогащения угольных шламов гидроотвала

Fig. 2. Schematic diagram of sludge dump coal enrichment

³ Левкин Н. Д. Оценка геоэкологической ситуации и способы снижения деструкции окружающей среды в угледобывающих промышленных регионах: дис. ... д-ра. техн. наук: 25.00.36. Тула, 2011. 234 с.



Кроме того, на пробе текущих хвостов фабрики класс -13+2 мм с зольностью 33,1 % можно рассматривать как отсев марки ДСШ, который по качеству аналогичен отсеvu по ТУ 12.36.203-91. Он может быть пригоден для пылевидного сжигания и коммунальных нужд.

Результаты технологических испытаний (табл. 3) позволили сделать заключение о принципиальной возможности вовлечения в переработку шламовых угольных продуктов производственного участка «Обогатительная фабрика».

Критическая наполненность гидроотвала производственного участка «Обогатительная фабрика» обусловила проведение укрупненных технологических испытаний, на основании которых в настоящее время принято решение о разработке проектной документации

для переработки гидроотвала фабрики [16–18]. Проектируемая установка предполагает получение дополнительной продукции в виде угольного концентрата и магнетитового концентрата. Магнетит в процессе винтовой сепарации концентрируется в породной фракции, после ее магнитной сепарации полученная магнитная фракция может быть использована в операции тяжелосредного обогащения.

Заключение

На основании проведенных лабораторных исследований установлена целесообразность раздельного обогащения углей по четырем машинным классам: более 13 мм – методами тяжелосредной сепарации или на отсадочных машинах для крупного класса; 3...13 мм – с помощью отсадочных машин для мелкого класса;

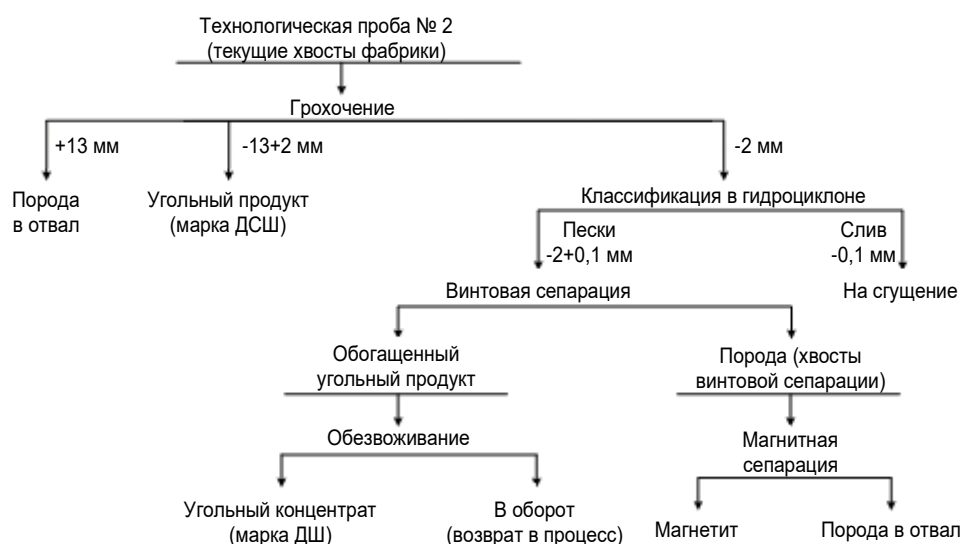


Рис. 3. Принципиальная схема обогащения текущих хвостов

Fig. 3. Schematic diagram of tailings enrichment

Таблица 3. Результаты обогащения шламовых продуктов обогатительной фабрики
Table 3. Results of coal preparation plant sludge enrichment

Параметр	Проба № 1 (из гидроотвала)	Проба № 2 (текущие хвосты)
Угольный концентрат – концентрат винтовой сепарации:		
выход, %	28,8	32,7
зольность, %	22,9	25,8
Отсев -13+2 мм – марка ДСШ:		
выход, %	–	14
зольность, %	–	31,7
Суммарный выход угольных продуктов для потребления	28,8	46,7
Породные продукты:		
выход, %	71,2	53,3
зольность, %	65,6	69,2



0,2–0,1...3 мм – на винтовых сепараторах и винтовых шлюзах; менее 0,2...0,1 мм – во флотационных машинах. Это позволит повысить извлечение горючей массы в концентрат и удешевит процесс обогащения за счет снижения объема угля, направляемого на обогащение в отсадочных машинах, потребляющих большое количество воды, и на дорогостоящую флотацию. Отмечено, что винтовые шлюзы по сравнению с винтовыми сепараторами имеют ряд технологических преимуществ, обусловленных более широким диапазоном крупности обогащаемого материала и возможностью получения более чистых отходов. Для повышения эффективности винтовой сепарации рекомендуется сочетание основной и контрольной сепарации тяжелого продукта, а также перемешка легкого продукта и разделе-

ние промежуточных продуктов в отдельном цикле с добавкой выделенных продуктов соответственно к тяжелому и легкому [19, 20].

Технологические испытания винтовой сепарации на шламовых продуктах гидроотвала производственного участка «Обогатительная фабрика» компании «Разрез “Черемховуголь”» показали перспективность использования винтовых аппаратов (сепараторов и шлюзов) конструкции и производства ООО «Научно-производственная компания “Спирит”». Технология винтовой сепарации при переработке угольных шламов, являющихся отходами обогащения угольного сырья, позволяет получить качественное вторичное топливо без дополнительных затрат на добычу по экологически чистой технологии при низких энергозатратах.

Список источников

1. Сокур А. К. Обзор гравитационных технологий обогащения угольных шламов нефлотационной крупности // Збагачення корисних копалин: наук.-техн. зб. 2012. № 51. С. 126–136.
2. Полулях А. Д., Полулях Д. А. Применение тяжелосредних гидроциклонов для обогащения угля // Збагачення корисних копалин: наук.-техн. зб. 2011. № 47. С. 116–126.
3. Зарубин Л. С., Иофа М. Б. Технология глубокого обогащения и обессеривания угля в тяжелосредних гидроциклонах за рубежом: обзор. М.: ЦНИЭИУголь, 1980. 29 с.
4. Кочетов В. В., Левандович А. П., Беринберг З. Ш., Кирнарский А. С., Пилов П. И. Применение винтовых сепараторов при обогащении углей // Обогащение полезных ископаемых. 1998. № 1. С. 80–87.
5. Сипотенко А. И., Коткин А. М., Перемежко Э. А. Совершенствование техники и технологии обработки шламов для сокращения их выпуска как отдельного товарного продукта. М.: ЦНИЭИ Уголь, 1991. 56 с.
6. Дамба А., Станис Е. В. Использование комплексной геоэкологической оценки в экологическом аудите при разработке угольных месторождений Монголии // Вестник Российского университета дружбы народов. Серия: Экология и безопасность жизнедеятельности. 2015. № 2. С. 100–106.
7. Трубецкой К. Н. Современное состояние минерально-сырьевой базы и горнодобывающей промышленности России // Горный журнал. 1995. № 1. С. 3–7.
8. Трубецкой К. Н., Уманцев В. Н., Никитин М. Б. Классификация техногенных месторождений, основные категории и понятия // Горный журнал. 1989. № 12. С. 6–9.
9. Шадренова И. В., Зелинская Е. В., Волкова Н. А., Орехова Н. Н. Горнопромышленные отходы: ресурсный потенциал и технологии переработки (на примере Сибири и Урала) // Современные проблемы комплексной переработки труднообогатимых руд и техногенного сырья (Плаксинские чтения – 2017): материалы Международ. науч. конф. (г. Красноярск, 12–15 сентября 2017 г.). Красноярск: Изд-во СФУ, 2017. С. 15–21.
10. Бобриков В. В., Калабухов М. Л., Канев Н. И. Исследование и совершенствование процессов классификации и обогащения угольного шлама на Печеровской ЦОФ // III Конгресс обогатителей стран СНГ (г. Москва, 19–22 марта 2001 г.). М.: Изд-во МИСиС, 2001. С. 69–75.
11. Кирнарский А. С., Артемов С. В., Гаевой В. В. Влияние условий подготовки исходного продукта на результаты мокрой винтовой сепарации угля // Обогащение полезных ископаемых. 1998. № 1. С. 126–127.
12. Прокопьев С. А., Пономарева А. М., Болотин М. Л. Переработка техногенного сырья углеобогательной фабрики // Экологические проблемы и новые технологии комплексной переработки минерального сырья (Плаксинские чтения – 2002): материалы Международ. совещ. (г. Чита, 16–19 сентября 2002 г.). Чита: ПКЦ-Альтекс, 2002. С. 79–82.
13. Кирнарский А. С. Принцип однофункциональности разделительных процессов при обогащении каменного угля // Уголь. 2012. № 5. С. 94–96.
14. Новак В. И., Козлов В. А. Обзор современных способов обогащения угольных шламов // Горный информационно-аналитический бюллетень (научно-технический журнал). 2012. Отдельный выпуск № 5. Угледобыча: технологии, безопасность, переработка и обогащение. С. 130–138.
15. Козлов В. А., Новак В. И. Оптимизация работы углеобогательной фабрики с целью получения максимального выхода концентрата // Горный информационно-аналитический бюллетень (научно-технический журнал). 2019. № 4. С. 175–186. <https://doi.org/10.25018/>



0236-1493-2019-04-0-175-186.

16. Белоусов В. А. Основные направления интенсификации флотационного обогащения углей // Международный журнал прикладных и фундаментальных исследований. 2014. № 11-5. С. 719–721.

17. Козлов В. А., Козлов Е. В. Выбор наиболее рациональных методов оценки обогатимости углей для практического применения при проектировании обогатительных фабрик // Горный информационно-аналитический бюллетень (научно-технический журнал). 2012. № 4. С. 150–155.

18. Белоусов В. А. Перспективные методы обогащения угольных шламов // Международный журнал

прикладных и фундаментальных исследований. 2014. № 4. С. 15–17.

19. Гришин И. А., Князбаев Ж. С. К проблеме выбора метода обогащения для углей различной стадии метаморфизма // Успехи современного естествознания. 2016. № 1. С. 107–110.

20. Сосновский С. А., Сачков В. И. Комплексная переработка техногенного углесодержащего сырья // Проблемы комплексной и экологически безопасной переработки природного и техногенного минерального сырья (Плаксинские чтения – 2021): материалы Международ. науч. конф. (г. Владикавказ, 4–8 ноября 2021 г.). Владикавказ: Изд-во СКГМИ (ГТУ), 2021. С. 498–501.

References

1. Sokur A. K. Review of gravitational concentration technologies for coal slimes of non-flotation size. *Obogashchenie poleznykh iskopaemykh: nauch.-tekhn. sb.* 2012; 51:126-136. (In Ukrainian).

2. Polulyakh A. D., Polulyakh D. A. Use of heavy-medium hydrocyclones for coal beneficiation. *Obogashchenie poleznykh iskopaemykh: nauch.-tekhn. sb.* 2011;47:116-126.

3. Zarubin L. S., Iofa M. B. *Foreign technology of coal deep enrichment and desulfurization in heavy-medium hydrocyclones abroad: review.* Moscow: Central Research Institute of Economics and Scientific and Technical Information of the Coal Industry; 1980. 29 p. (In Russ.).

4. Kochetov V. V., Levandovich A. P., Berinberg Z. Sh., Kurnarskii A. S., Pilov P. I. Use of spiral separators in coal concentration. *Obogashchenie polezny iskopaemykh.* 1998;1:80-87. (In Russ.).

5. Sipotenko A. I., Kotkin A. M., Peremezhko E. A. *Improving methods and technology of sludge treatment to reduce their output as a separate commercial product.* Moscow: TsNIEI Ugol'; 1991. 56 p. (In Russ.).

6. Damba A., Stanis E. V. The use of an integrated geo-ecological assessment in environmental audit at the open coal mining in Mongolia. *Vestnik Rossiiskogo universiteta družby narodov. Seriya: Ekologiya i bezopasnost' zhiznedeyatel'nosti* = *RUDN Journal of Ecology and Life Safety.* 2015;2:100-106. (In Russ.).

7. Trubetskoi K. N. The current state of the mineral resource base and mining industry in Russia. *Gornyi zhurnal.* 1995;1:3-7. (In Russ.).

8. Trubetskoi K. N., Umantsev V. N., Nikitin M. B. Classification of technogenic deposits, main categories and concepts. *Gornyi zhurnal.* 1989;12:6-9. (In Russ.).

9. Shadrinova I. V., Zelinskaya E. V., Volkova N. A., Orekhova N. N. Mining waste: resource potential and processing technologies (on the example of Siberia and the Urals). In: *Sovremennye problemy kompleksnoi pererabotki trudnoobogatimyykh rud i tekhnogennogo syr'ya (Plaksin'skie chteniya – 2017): materialy Mezhdunar. nauch. konf. = Modern problems of complex processing of refractory ores and technogenic raw materials (Plaksin'sky Readings – 2017): materials of the International scientific conference.* 12–15 September 2017, Krasnoyarsk. Krasnoyarsk: Siberian Federal University; 2017, p. 15–21. (In Russ.).

10. Bobrikov V. V., Kalabukhov M. L., Kanev N. I. Re-

search and improvement of coal sludge classification and enrichment at the Pecherovskaya Central Preparation Plant. In: *III Kongress obo-gatitelei stran SNG = 3^d CIS Congress of the Mineral Processing Engineers.* 19–22 March 2001, Moscow. Moscow: National University of Science and Technology (MISIS); 2001, p. 69–75. (In Russ.).

11. Kurnarskii A. S., Artemov S. V., Gaevoi V. V. Influence of initial product preparation conditions on the results of coal wet spiral separation. *Obogashchenie polezny iskopaemykh.* 1998;1:126-127. (In Russ.).

12. Prokop'ev S. A., Ponomareva A. M., Bolotin M. L. Processing of technogenic raw materials of a coal washing plant. In: *Ekologicheskie problemy i novye tekhnologii kompleksnoi pererabotki mineral'nogo syr'ya (Plaksin'skie chteniya – 2002): materialy Mezhdunar. soveshch. = Environmental problems and new technologies for the complex processing of mineral raw materials (Plaksin'sky readings – 2002): materials of the International meeting.* 16–19 September 2002, Chita. Chita: PKTs-Al'teks; 2002, p. 79–82. (In Russ.).

13. Kurnarskii A. S. The principle of single functionality of separation processes under hard coal beneficiation. *Ugol' = Russian Coal Journal.* 2012;5:94-96. (In Russ.).

14. Novak V. I., Kozlov V. A. Review of modern coal sludge concentration methods. *Gornyi informatsionno-analiticheskii byulleten' (nauchno-tekhnicheskii zhurnal) = Mining informational and analytical bulletin (scientific and technical journal).* 2012;5:130-138. (In Russ.).

15. Kozlov V. A., Novak V. I. Optimizing coal preparation plant performance towards maximum concentrate yield. *Gornyi informatsionno-analiticheskii byulleten' (nauchno-tekhnicheskii zhurnal) = Mining informational and analytical bulletin (scientific and technical journal).* 2019; 4:175-186. (In Russ.). <https://doi.org/10.25018/0236-1493-2019-04-0-175-186>.

16. Belousov V. A. Main directions of coal flotation enrichment intensification. *Mezhdunarodnyi zhurnal prikladnykh i fundamental'nykh issledovaniy.* 2014;11-5:719-721. (In Russ.).

17. Kozlov V. A., Kozlov E. V. Selection of the most rational evaluation methods of coal washability to be applied when designing concentration plants. *Gornyi informatsionno-analiticheskii byulleten' (nauchno-tekhnicheskii zhurnal) = Mining informational and analytical bulletin (sci-*



entific and technical journal). 2012;4:150-155. (In Russ.).

18. Belousov V. A. Promising methods of coal sludge enrichment. *Mezhdunarodnyi zhurnal prikladnykh i fundamental'nykh issledovaniy*. 2014;4:15-17. (In Russ.).

19. Grishin I. A., Knyazbaev Z. S. To the enrichment method choice problem for coals of various stage of the metamorphism. *Uspekhi sovremennogo estestvoznaniya*. 2016;1:107-110. (In Russ.).

20. Sosnovskii S. A., Sachkov V. I. Complex processing of technogenic coal-containing raw materials. In:

Problemy kompleksnoi i ekologicheskoi bezopasnoi pererabotki prirodnogo i tekhnogenogo mineral'nogo syr'ya (Plaksinskie chteniya – 2021): materialy Mezhdunar. nauch. konf. = Problems of complex and environmentally safe processing of natural and technogenic mineral raw materials (Plaksinsky readings – 2021): materials of the International scientific conference. 4–8 November 2021, Vladikavkaz. Vladikavkaz: North Caucasian Institute of Mining and Metallurgy (State Technological University); 2021, p. 498–501. (In Russ.).

Информация об авторах / Information about the authors



Соловеев Надежда Павловна,

ведущий инженер отдела комплексного использования минерального сырья,
Институт земной коры СО РАН,
г. Иркутск, Россия,
руководитель группы обогащения руд благородных металлов,
ООО «Научно-производственная компания «Спирит»»,
г. Иркутск, Россия,
snp@spirit-irk.ru.

Nadezhda P. Soloveenko,

Leading Engineer of the Department of Complex Use of Mineral Raw Materials,
Institute of the Earth's Crust SB RAS,
Irkutsk, Russia,
Head of the Precious Metal Ore Processing Group,
Research and Production Company Spirit, LLC,
Irkutsk, Russia,
snp@spirit-irk.ru.



Болотин Никита Михайлович,

ведущий инженер отдела комплексного использования минерального сырья,
Институт земной коры СО РАН,
г. Иркутск, Россия,
инженер-обогащатель,
ООО «Научно-производственная компания «Спирит»»,
г. Иркутск, Россия,
nmb@spirit-irk.ru.

Nikita M. Bolotin,

Leading Engineer of the Department of Complex Use of Mineral Raw Materials,
Institute of the Earth's Crust SB RAS,
Irkutsk, Russia,
Mineral Processing Engineer,
Research and Production Company Spirit, LLC,
Irkutsk, Russia,
nmb@spirit-irk.ru.

Вклад авторов / Contribution of the authors

Соловеев Н. П. – научное руководство исследованием, критический анализ литературы, формулировка научных гипотез, описание результатов и формирование выводов исследования, подготовка рукописи к печати. Болотин Н. М. – сбор статистических данных, табличное и графическое представление результатов, описание результатов и формирование выводов исследования, подготовка рукописи к печати.

Soloveenko N. P. carried out the scientific management of the research, performed critical analysis of literature, formulated scientific hypotheses, described the scientific results, formulated the conclusions and prepared the manuscript for publication. Bolotin N. M. collected statistical data, designed the tables and graphs representing the research results, described the scientific results, formulated the conclusions and prepared the manuscript for publication.

**Конфликт интересов / Conflict of interests**

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

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

Информация о статье / Information about the article

Статья поступила в редакцию 21.09.2022; одобрена после рецензирования 26.10.2022; принята к публикации 29.11.2022.

The article was submitted 21.09.2022; approved after reviewing 26.10.2022; accepted for publication 29.11.2022.



Уважаемые авторы!

Требования к оформлению научных статей, изложенные ниже, разработаны редакцией журнала для того, чтобы помочь Вам предоставить все необходимые для публикации сведения и избежать наиболее распространенных ошибок.

1. Научный журнал «Науки о Земле и недропользование» принимает к публикации научные материалы в виде статей по следующим тематикам:

- 25.00.22. Геотехнология (подземная, открытая и строительная) (технические науки),
- 25.00.35. Геоинформатика (геолого-минералогические науки);
- 1.6.9. Геофизика (технические науки),
- 1.6.9. Геофизика (геолого-минералогические науки),
- 1.6.10. Геология, поиски и разведка твердых полезных ископаемых, минерагения (геолого-минералогические науки),
- 2.8.1. Технология и техника геологоразведочных работ (технические науки),
- 2.8.3. Горнопромышленная и нефтегазопромысловая геология, геофизика, маркшейдерское дело и геометрия недр (технические науки),
- 2.8.3. Горнопромышленная и нефтегазопромысловая геология, геофизика, маркшейдерское дело и геометрия недр (геолого-минералогические науки).

2. Приоритетными для публикации являются статьи в области междисциплинарных и мультидисциплинарных исследований, а также результаты работ с использованием цифровых технологий.

3. Статьи принимаются на русском, английском, китайском и монгольском языках от авторов, работающих в российских и иностранных вузах, академических и отраслевых научно-исследовательских институтах, а также производственных горно-геологических организациях.

4. Статья сопровождается:

- электронными версиями всех документов (скан), в том числе:

авторского заявления, заполненного и подписанного всеми соавторами статьи;

авторского договора;

сведений обо всех авторах на русском и английском языках с указанием названия места работы, должности и структурного подразделения, наличия ученой степени, ученого звания, почтового и электронного адресов каждого автора статьи, а также номера телефона автора, ответственного за коммуникацию;

акта экспертного заключения о возможности открытой публикации материалов;

- цветными портретными фотографиями авторов на светлом фоне (деловой стиль) в хорошем качестве в формате PNG / JPEG;

– по желанию автора в статье могут быть указаны его профили в системах цитирования и другие сведения (профили в РИНЦ, ORCID, Scopus, в других системах цитирования, можно предоставить ссылку на личную страницу в Интернете, включая страницы в социальных сетях).

Обращаем Ваше внимание, что вся перечисленная выше информация публикуется в журнале в открытом доступе!

5. Статьи принимаются ответственным секретарем в электронном виде в формате Microsoft Word для Windows по электронной почте nzn@istu.edu. Шрифт – Arial, размер шрифта – 12 (строки через 1 интервал), перенос слов – автоматический. Параметры страницы: отступы сверху и снизу – 2,5 см, слева и справа – 2 см, абзацный отступ – 0,6 см, ориентация страницы – книжная.

6. Объем текста – от 10000 знаков, включая пробелы, иллюстрационный материал – до 6 рисунков.

7. Статьи должны быть структурированы и выполнены по международному стандарту IMRAD. Структура статьи: индекс УДК, название статьи, фамилия, имя, отчество авторов,



название учреждения, где выполнена работа, аннотация и ключевые слова на языке оригинала (русском / китайском / монгольском) и английском языках, введение, цель исследования, материал и методы исследования, результаты исследования и их обсуждение, выводы или заключение, библиографический список и references, критерии авторства, конфликт интересов и сведения об авторах (вся информация предоставляется одним файлом, названным следующим образом: *Фамилия первого автора – Первые три-четыре слова названия.doc*).

8. Рекомендуемая длина названия статьи – до 100 знаков с пробелами. Название статьи должно быть лишено сокращений, аббревиатур, описывать содержание статьи точно и конкретно, при этом оно должно быть достаточно длинным, чтобы однозначно выразить главную идею статьи, и коротким настолько, чтобы ни одно слово нельзя было выбросить без потери смысла.

9. Аннотация должна отражать основную идею статьи, поскольку для большинства читателей она является главным источником информации о представленном исследовании. Объем аннотации – 1500–2000 знаков, примерная структура: цель, методы, предмет, объект и результаты исследования, выводы. Не следует ссылаться на таблицы и / или рисунки, приведенные в основном в тексте статьи, а также использованную литературу, поскольку аннотации также публикуются отдельно от статьи. Не используйте в аннотации сокращения, аббревиатуры, а также формулы, так как аннотации в большинстве баз данных, начиная с РИНЦ, публикуются в формате, исключающем отображение формул.

Ключевые слова должны отражать суть исследования, способствовать работе поисковых систем, по количеству не превышать 10 единиц, словосочетания – не более 3 единиц.

10. Формулы в тексте должны быть набраны в специальном редакторе формул Microsoft Word посредством опции «вставка» – «уравнение». Все экспликации элементов формул необходимо также выполнять в редакторе формул.

11. Таблицы должны содержать только необходимые данные и представлять собой обобщенные и статистически обработанные материалы с указанием обозначения переменных. Каждая таблица снабжается заголовком. Формат таблиц – книжный, направление шрифта – по горизонтали.

12. Графические материалы к статье (рисунки и фотографии) представляются в минимальном количестве (не более 6 единиц) и должны быть выполнены в соответствии с требованиями к геологической графике. Выбирается масштаб, пригодный для тиражирования, а размер – не более 170×245 мм. Графические материалы должны допускать перемещение в тексте и возможность изменения размеров. Каждый рисунок сопровождается надписями в содержательной части и подрисуночной подписью, в которой представляется объяснение всех его элементов. Названия рисунков и подрисуночные подписи должны быть максимально краткие, основная информация предоставляется в тексте.

Все надписи на рисунках должны быть редактируемыми и выполненными 8 кеглем шрифта Arial (основной) на языке текста статьи. В некоторых случаях размер шрифта может быть уменьшен до 5-6 pt. Буквенная нумерация рисунков выполняется 10 кеглем шрифта Arial (полужирный курсив) на английском языке. Помимо представления в тексте статьи рисунки должны быть дополнительно предоставлены отдельными файлами. Векторная графика дополнительно предоставляется в форматах .cdr, .ai с возможностью редактирования, при экспорте из других программ следует использовать формат PostScript (.eps) с разрешением 300 dpi. Фотографии, сканированные материалы представляются в формате TIFF или PNG / JPEG (сохранение в формате PNG / JPEG необходимо производить в максимально высоком качестве). Разрешение растровой графики должно составлять не менее 600 dpi для черно-белых рисунков и не менее 300 dpi для фотографий. Схемы, графики, диаграммы предоставляются с расширением .xls (MS Excel).

13. Ссылки на литературные источники приводятся в квадратных скобках в порядке возрастания. Библиографический список формируется по мере упоминания источников в тексте.



Рекомендуемое количество источников в библиографическом списке – не менее 20, 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 нормативные правовые акты (законы, кодексы, указы, положения и пр.), учебные издания (учебники, учебные пособия, конспекты лекций, методические указания и т. д.), справочные издания (справочники, словари и энциклопедии), диссертации и авторефераты, геологические карты, а также страницы электронных ресурсов, не имеющие конкретного авторства. При необходимости обращения к этим источникам ссылку на них следует размещать в подстрочной сноске. Редакционная коллегия рекомендует в списке литературы ссылаться на статьи из журналов, входящих в международные базы данных по глобальным индексам цитирования (Scopus, Web of Science и другие).

14. Список литературы составляется в двух вариантах. В библиографическом описании статьи необходимо указывать всех авторов. Первый вариант (библиографический список) оформляется на языке источника в соответствии с ГОСТ Р 7.0.5 2008. Второй вариант (references) оформляется в виде транслитерации русского текста в латиницу с переводом на английский язык и служит для отслеживания цитируемости авторов. Примеры оформления источников в списках можно посмотреть на нашем сайте в разделе «Требования к статьям».

15. При подаче статьи авторами предоставляются на английском языке следующие элементы работы: название статьи, сведения об авторах, аннотация, ключевые слова, благодарности, названия таблиц и подрисуночные подписи, библиография.

16. Авторы статей должны придерживаться обязанностей, предусмотренных «Редакционной политикой журнала».

17. Редакция оставляет за собой право отклонять статьи, не отвечающие указанным требованиям. Поступающие в редакцию материалы возврату не подлежат.

18. Редакция оставляет за собой право на научное и литературное редактирование статей с последующим согласованием с авторами.

19. Представленные статьи проходят проверку на наличие заимствований.

20. Журнал выпускается с периодичностью 4 номера в год.

Внимание! Публикация статей является бесплатной.

Мы приглашаем Вас к участию в нашем проекте в качестве авторов, рекламодателей и читателей.

По вопросам публикации обращаться по адресу: 664074, Россия, г. Иркутск, ул. Лермонтова, 83, Иркутский национальный исследовательский технический университет, редколлегия, ауд. Е-317.

Главный редактор Раиса Моисеевна Лобацкая, тел.: +7 (3952) 405115, e-mail: lobatskaya@gmail.com.

Заместитель главного редактора Лариса Ивановна Аузина, тел.: +7 (3952) 405108, e-mail: lauzina@mail.ru.

Статьи следует направлять ответственному секретарю Марии Николаевне Долгих через личный кабинет на сайте www.nznj.ru или по электронной почте nzn@istu.edu; тел.: +7 (3952) 405108, адрес: 664074, Россия, г. Иркутск, ул. Лермонтова, 83, ауд. Е-219.



Образец оформления статьи

УДК 549.09

Минералого-технологические типы руд Томинского месторождения меди (Южный Урал)

Елена Михайловна Курчевская, Марина Владиславовна Яхно^b,
Аркадий Евгеньевич Сенченко^c

^{a,c}НИИПИ «Технологии обогащения минерального сырья», г. Иркутск, Россия

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

Автор, ответственный за переписку: Яхно Марина Владиславовна, ymar@istu.edu

Резюме: Цель. Цель данного исследования заключается в изучении технологических типов руд Томинского месторождения меди, а также минерального состава вмещающих пород и руд каждого из трех типов, выявлении минералогических и структурно-текстурных особенностей руд, выявлении взаимосвязи изменения рудной минерализации и степени метаморфизма для каждого типа руд. **Методы.** Рудные тела Томинского медно-порфирового месторождения, залегающие в диоритах и кварцевых диоритах, представляют собой прожилковые и прожилково-вкрапленные скопления в зонах дробления. На месторождении широко развиты метасоматиты кварц-серицитовый формации. Изучение типов руд проводилось с использованием микроскопов. **Результаты.** В результате выделено три геолого-технологических типа руд в пределах Томинского месторождения. Первый тип представлен первичными сульфидными рудами, которые наблюдаются в среднем ниже глубины 50–55 м. По составу это хлорит-мусковит-кварцевые метасоматиты. Вмещающие породы представлены серицитизированными, хлоритизированными и карбонатизированными диоритами. В составе руд преобладают халькопирит и пирит. Практически вся медь содержится в халькопирите. Второй тип – это рудные зоны вторичного сульфидного обогащения. Этот тип сложен первичными и вторичными сульфидами меди. Все породы аргиллизированные и представлены метасоматитами различного состава. Все виды пород несут в себе рудную минерализацию. К третьему типу относятся окисленные руды, которые образуют зону окисления месторождения. Они делятся на три подтипа: глинистые, глинисто-щебнистые и щебнистые руды. Глинистые руды залегают в самых верхних частях коры выветривания, глинисто-щебнистые руды слагают центральную ее часть, а руды в щебнистых образованиях отмечены в нижних горизонтах. Представлено петрографическое описание каждого из типов. Выявлены минералогические и структурно-текстурные особенности руд. В результате изучения петрографического состава каждого типа руд установлена различная степень метаморфизма и вследствие этого – изменение рудной минерализации. **Выводы.** Прослеживается влияние метасоматических процессов, изменивших строение и минеральный состав руд. Для первого типа руды характерно наличие первичных пород – диоритов с насыщенной сульфидной вкрапленностью и с незначительными метасоматическими изменениями. В зоне вторичного обогащения породы претерпели интенсивное метасоматическое изменение. Породы этой зоны насыщены гидроксидами железа. Для зоны интенсивного выветривания характерны глинистые и хлоритизированные породы. Рудная минерализация представлена исключительно окисленными минералами. Сульфиды единичны. Различия в минеральном составе трех типов руд влияют на выбор способов переработки руды в пределах Томинского месторождения.

Ключевые слова: Томинское месторождение, медно-порфировое оруденение, метаморфизм, технологические типы руд

Финансирование:

Благодарности:

Mineralogical and technological types of Tominskoye deposit copper ores (Southern Ural)

Elena M. Kurchevskaya^a, Marina V. Yakhno^b, Arkady Y. Senchenko^c

^{a,c}NIPI TOMS (Scientific Research and Design Institute "Technologies of Minerals Separation"), Irkutsk, Russia

^bIrkutsk National Research Technical University, Irkutsk, Russia

Corresponding author: Marina V. Yakhno, ymar@istu.edu

Abstract. Purpose. The purpose of the article is investigation of the technological types of Tominskoye copper deposit ores; examination of the mineral composition of the host rocks and ores of each of the three types; identification of mineralogical and structural-textural features of ores, research of the relationship of mineralization and metamorphism intensity alteration for each type of ore. **Methods.** Ore bodies of the Tominskoye porphyry copper deposit occurring in the diorites and quartz diorites are veinlet and porphyry-stringer clusters in crush zones. The deposit is characterized with the predominant metasomatic rocks of quartz-sericite formation. **Results.** Three geological and technological ore types are distinguished within the Tominskoye field. The first type is represented by primary sulfide ores, which occur on average lower than 50–55 m depth. By composition they are chlorite-muscovite-quartz metasomatic rocks. The host rocks are represented by sericitized, chloritized and carbonated diorites. Chalcopyrite and pyrite are predominant elements in ore compo-



sition. Chalcopryrite contains carbonated diorites. Chalcopryrite and pyrite are predominant elements in ore composition. Chalcopryrite contains almost all of the copper. The second type includes the ore zones of secondary sulfide concentration. This type is composed of primary and secondary copper sulfides. All the rocks are dirty argillaceous and are represented by metasomatic rocks of different composition. All types of rocks feature ore mineralization. The third type covers oxidized ores, which form the oxidation zone of the deposit. They are divided into three subtypes: clay, claydetrital and detrital ores. Clay ores occur in the uppermost parts of the crust of weathering. Clay-detrital ores compose its central part, while ores in detrital formations have been found in the lower horizons. Each of the type is given a petrographic description. Mineralogical and structural-textural features of ores are identified. The study of the petrographic composition of each type of ores showed a varying degree of metamorphism that resulted in changes in ore mineralization. **Conclusions.** The influence of metasomatic processes is indicated. The last have changed the structure and mineral composition of ores. The presence of primary rocks – diorites with saturated sulfide impregnation and insignificant metasomatic alterations is typical for the first type of ore. The rocks in the zone of secondary concentration have undergone intense metasomatic alteration. These rocks are saturated with iron hydroxides. The presence of clay and chloritized rocks characterize the zone of intense weathering. Ore mineralization is represented exclusively by oxidized minerals. Sulfides are rare. Variations in the mineral composition of the three types of ores influence the choice of ore processing methods at Tominskoye ore deposit.

Keywords: Tominskoye field, porphyry copper mineralization, metamorphism, technological ore types

Funding:

Acknowledgements:

Далее идут **текст статьи** (в виде: введение, цель исследования, материалы и методы исследования, результаты исследования и их обсуждение, заключение), **список источников** (references), **вклад авторов** (contribution of the authors) и **конфликт интересов** (conflict of interests).

Информация об авторах / Information about the authors

Фото
автора

Курчевская Елена Михайловна,
старший научный сотрудник,
НИИПИ «Технологии обогащения минерального сырья»,
г. Иркутск, Россия,
kurchevskaya@tomsgroup.ru,
ORCID.

Elena M. Kurchevskaya,
Senior Researcher,
Scientific Research and Design Institute “Technologies of Minerals Separation”,
Irkutsk, Russia,
kurchevskaya@tomsgroup.ru,
ORCID.

Фото
автора

Яхно Марина Владиславовна,
старший преподаватель кафедры геологии и геохимии полезных ископаемых,
Иркутский национальный исследовательский технический университет,
г. Иркутск, Россия,
ymar@istu.edu,
ORCID.

Marina V. Yakhno,
Senior Lecturer of the Department of Geology and Geochemistry of Minerals,
Irkutsk National Research Technical University,
Irkutsk, Russia,
ymar@istu.edu,
ORCID.

Фото
автора

Сенченко Аркадий Евгеньевич,
генеральный директор,
НИИПИ «Технологии обогащения минерального сырья»,
г. Иркутск, Россия,
senchenko@tomsgroup.ru,
ORCID.

Arkady E. Senchenko,
CEO,
Scientific Research and Design Institute “Technologies of Minerals Separation”,
Irkutsk, Russia,
senchenko@tomsgroup.ru,
ORCID.

НАУКИ О ЗЕМЛЕ И НЕДРОПОЛЬЗОВАНИЕ

12+

Научный журнал

Том 45 № 4 (81) 2022

Дизайнер А. А. Хохряков
Редактор Ф. А. Посысоева
Перевод на английский язык В. В. Батицкой
Компьютерная верстка Ф. А. Посысоевой

Издание распространяется бесплатно

Выход в свет 30.12.2022 г. Формат 60×90/8.
Бумага офсетная. Печать цифровая. Усл. печ. л. 21,5.
Тираж 500 экз. Зак. 160. 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