

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

НАУКИ О ЗЕМЛЕ И НЕДРОПОЛЬЗОВАНИЕ

Tom 45 № 1 2022
Vol.

EARTH SCIENCES AND SUBSOIL USE

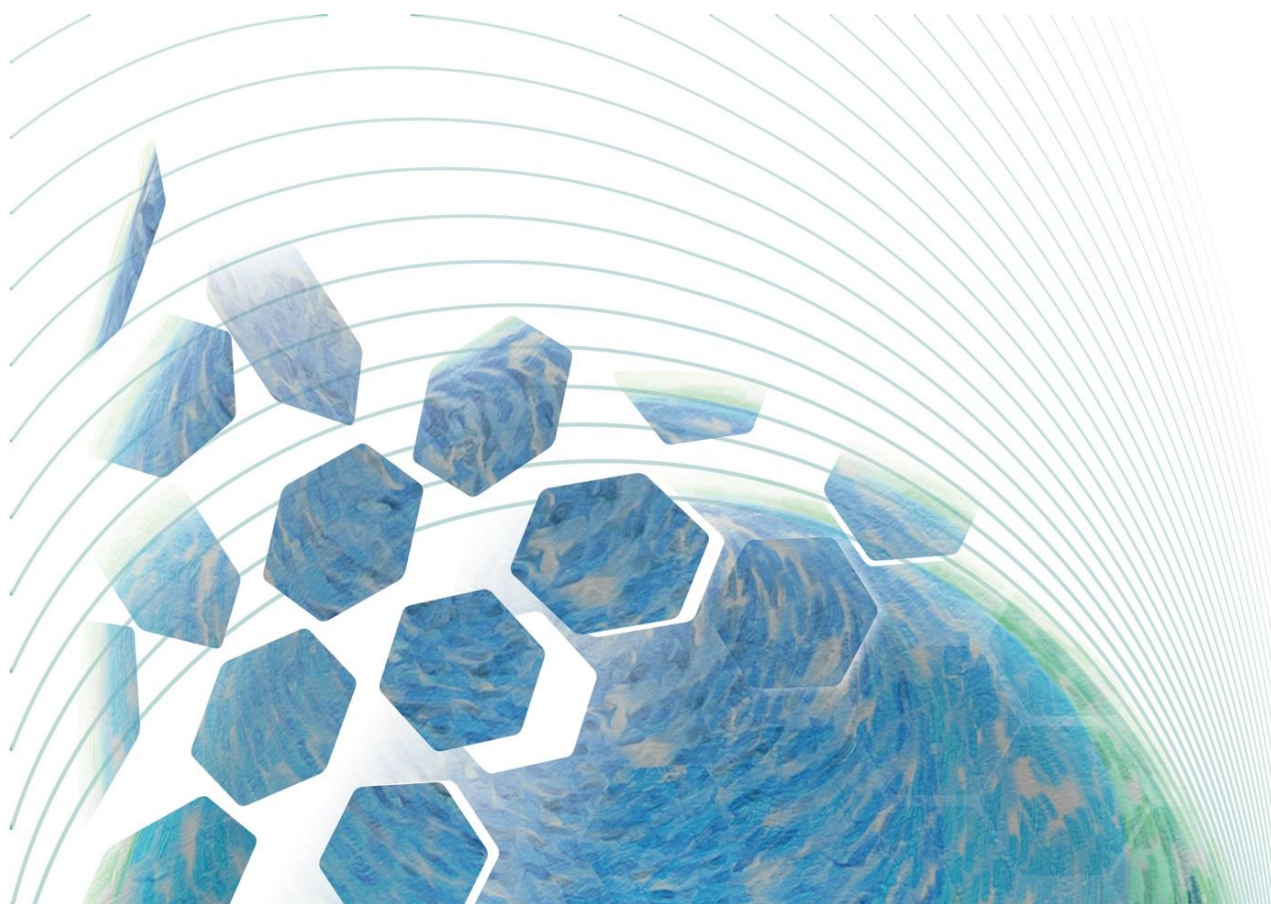
ISSN 2686-9993 (print)
ISSN 2686-7931 (online)

НАУКИ О ЗЕМЛЕ И НЕДРОПОЛЬЗОВАНИЕ

Том
Vol. 45 № 1 2022

EARTH SCIENCES AND SUBSOIL USE

NAUKI O ZEMLE
I NEDROPOL'ZOVANIE



Редакционный совет

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

Председатель редакционного совета:

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

Редакционная коллегия

Главный редактор:

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

Заместители главного редактора:

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

Ответственный секретарь:

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

Журнал «Науки о Земле и недропользование» входит в действующий Перечень изданий ВАК для публикации основных результатов диссертаций на соискание ученой степени кандидата наук, на соискание ученой степени доктора наук, включен в Научную электронную библиотеку (eLIBRARY.RU) для создания российского индекса научного цитирования, рассылается в Российскую книжную палату, ВНИИТИ РАН. Журнал включен в научную электронную библиотеку CyberLeninka, в базы данных открытого доступа DOAJ, OAJI, в международный каталог периодических изданий Ulrich's Periodicals Directory, в базу данных EBSCO. Журнал распространяется по подписке в каталоге агентства ЗАО ИД «Экономическая газета» «Объединенный каталог. Пресса России. Газеты и журналы», подписной индекс – 41538 (ОК+ЭК) (адрес агентства ЗАО ИД «Экономическая газета»: 8 (499) 1520989; izdatcat@ideg.ru). Статьи, опубликованные в журнале, реферируются и рецензируются. В журнал принимаются статьи по научному направлению «Науки о Земле».

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

Периодичность выхода – 4 раза в год

Учредитель:

ФГБОУ ВО «Иркутский национальный исследовательский технический университет»

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

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

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

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

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

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

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

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

Chairman of the Editorial Council

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

Editorial Board

Editor-in-Chief

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

Deputy Editors-in-Chief

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

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

Executive secretary

Khramovskikh V. A., Cand. Sci. (Eng.), Associate Professor, Irkutsk National Research Technical University (Irkutsk, Russia)

The journal "Earth sciences and subsoil use" is on the current List of publications on the main results of candidate's and doctoral theses, the State Commission for Academic Degrees and Titles of the Russian Federation. It is included in the Scientific Electronic Library (eLIBRARY.RU) in order to create the Russian Science Citation Index. It is circulated to the Russian Book Chamber and the All-Russian Institute for Scientific and Technical Information of the Russian Academy of Sciences. The journal is included in CyberLeninka (the scientific electronic library), DOAJ, OAJI (open-access databases), Ulrich's Periodicals Directory, and EBSCO database. It is distributed through the catalog of JSC "Economic Newspaper" Publishing House "The united catalog. Russian press. Newspapers and journals", the subscription index 41538 (OK+EC) (address of JSC "Economic Newspaper" Publishing House: 8 (499) 1520989; izdatcat@ideg.ru). The articles published in the journal are abstracted and peer-reviewed. The journal accepts articles related to the "Earth sciences" direction.

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

Periodicity: 4 times a year

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

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

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

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

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



СОДЕРЖАНИЕ

Содержание.....	4
-----------------	---

Колонка главного редактора.....	6
---------------------------------	---

Геология, поиски и разведка месторождений полезных ископаемых

Хассан Б. Оценка эффективности интегрированных исследований продольных и поперечных волн с помощью ультразвука.....	8
Дамдинова Л. Б., Сажина Т. И., Дамдинов Б. Б. Минералогия и условия формирования руд Холтосонского вольфрамового месторождения.....	34
Радомский С. М., Радомская В. И. Свойства благородных металлов золоторудного месторождения Пионер.....	50

Разведка и разработка месторождений полезных ископаемых

Зайцев В. И., Карпиков А. В. Бурение скважин с комбинированным регулированием давления.....	60
Казарян А. А. Исследование на трехмерной модели проявления бокового давления во вскрышных породах сооружаемого в ущелье отвала.....	73
Азизхонов И. М., Тальгамер Б. Л., Усмонов Н. К. Оценка способов и результатов опробования эфелей и отвалов на рудном месторождении.....	80
К сведению авторов.....	90



CONTENTS

Contents.....	5
---------------	---

Chief Editor's Column.....	7
----------------------------	---

Geology, Prospecting and Exploration of Mineral Deposits

Hassan B. Viability assessment of integrated P- and S-wave surveys using ultrasound.....	8
Damdinova L. B., Sazhina T. I., Damdinov B. B. Mineralogy and formation conditions of Kholtozon tungsten deposit ores.....	34
Radomskii S. M., Radomskaya V. I. Features of noble metals at Pioneer gold deposit.....	50

Exploration and Development of Mineral Deposits

Zaitsev V. I., Karpikov A. V. Well drilling with combined pressure control.....	60
Khazaryan A. A. A three-dimensional model study of lateral pressure manifestation in gorge dump overburden.....	73
Azizkhonov I. M., Talgamer B. L., Usmonov N. K. Evaluation of methods and results of dredging waste and dump sampling at ore deposit.....	80
Information for the Authors.....	90



Слово редактора



Добрый день, дорогие читатели, а также авторы – реальные и потенциальные! Перед вами очередной номер журнала, посвященный современным проблемам разных направлений геологических исследований. Примечательной особенностью этого выпуска является обширная география присланных статей – от Канады, Армении, Таджикистана до различных городов России, таких как Улан-Удэ, Благовещенск и, конечно, Иркутск. Нас разделяют километры, версты, мили, но, к счастью, у всех сохраняется общий глубокий интерес к геологии, стремление к ее развитию, получению новых знаний, расширению горизонтов науки. В этом номере журнала вы найдете статьи о новых методах геофизических, геологических и минералогических исследований, о развитии техники разведки и технологий разведки и извлечения полезных ископаемых.

Накануне традиционного Дня геолога поздравляю всех вас с нашим профессиональным праздником! Нескучных всем нетореных троп, плодотворных идей, продуктивных открытий, мудрых решений любых проблем, возникающих на ваших геологических дорогах, мира, процветания и счастья!

Раиса Моисеевна Лобацкая,
главный редактор



From the Editor

Dear readers, active and prospect authors,

I'm very happy to introduce a new issue of our journal devoted to the current challenges in the various fields of geological studies. It is the vast geography of submitted articles (from Canada, Armenia, Tajikistan to the Russian cities such as Ulan-Ude, Blagoveshchensk and, of course, Irkutsk) that differs this issue from the previous ones. Kilometers and miles lie between us, but, fortunately, all of us retain a common deep interest in geology, the desire to develop it, gain new knowledge, and expand the horizons of science. This issue of the journal contains the articles on new methods of geophysical, geological and mineralogical researches as well as on the development of exploration techniques and technologies for mineral prospecting and extraction.

As we approach the traditional Geologist's Day, I would like to congratulate all of you on our professional holiday and wish you travel unbeaten paths, generate brilliant ideas, make productive discoveries, take wise solutions when dealing with any geological problems, live in peace, prosperity and happiness!

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

GEOLOGY, PROSPECTING AND EXPLORATION
OF MINERAL DEPOSITS

Original article

<https://doi.org/10.21285/2686-9993-2022-45-1-8-33>Viability assessment of integrated P- and S-wave
surveys using ultrasoundBilal Hassan^a^aMemorial University of Newfoundland, St. John's, Canada

Abstract. Potential of, integrated geophysical, especially P- and S-wave combined near surface surveys, is assessed; demonstrated with use of sparingly, reduced chronographic i. e., time and velocity, (1 MHz) ultrasonic imaged data. Case of aqueous and non-aqueous, predominantly, fossil fuel origins spills seepage within near-surface geology is examined in terms of evaluation of possible complexities of fluids and surrounding interactions; which are experimentally simulated embodied as flow components of an immiscible displacement process. Such processes are understood and studied widely, within various, especially near-field geo- and engineering including environmental and also geo-disaster contexts. Interesting relevant scenarios, including aspects, of geological complexity of well known geographical locations while their subjugation also to various, whether natural or anthropogenic, stressors are presented alongside pertinent theory for better grasp, including plausibility, of methodology and inferring. Experimental analogues and geometrical constraints are explained in detail. Ultrasonic P- and S-wave, data in relevant context, also verified analytically, are comprehensively evaluated. S-wave data not only corroborates P-wave data attributes in time-space localization of displaced, from displacing phase, including a "dim spot", an interesting artifact corresponding to interface (or mixed phase) region, S-wave also manifested other elastic and thermo-mechanical characteristics of the same feature. Further a flow rate, especially, that of injection, control or dependence of a planned displacement process was confirmed, for example if required in tracer and remedial studies. S-waves characteristic suitability to reveal other fluid-fluid and fluid-solid interaction peculiarities at micro and possibly at nano scale, as amplitude effects, is foreseen to assume significant promise.

Keywords: integrated geophysical mapping, combined near surface surveys, P- and S-wave integration, ultrasonic characterization

Acknowledgements: Support of Drs. Stephen D. Butt and Charles A. Hurich (Memorial University of Newfoundland, Canada) in developing various geophysical analyses during graduate research is acknowledged, with that of Natural Sciences and Engineering Research Council of Canada, Petroleum Research Newfoundland and Labrador, Canada.

For citation: Hassan B. Viability assessment of integrated P- and S-wave surveys using ultrasound. *Nauki o Zemle i nedropol'zovanie = Earth sciences and subsoil use*. 2022;45(1):8-33. (In Russ.). <https://doi.org/10.21285/2686-9993-2022-45-1-8-33>.

ГЕОЛОГИЯ, ПОИСКИ И РАЗВЕДКА
МЕСТОРОЖДЕНИЙ ПОЛЕЗНЫХ ИСКОПАЕМЫХ

Научная статья

УДК 550.35

Оценка эффективности интегрированных исследований
продольных и поперечных волн с помощью ультразвукаБилал Хассан^a^aМемориальный университет Ньюфаундленда, г. Сент-Джонс, Канада

Резюме. В статье оценивается потенциал комплексной геофизической, в частности комбинированной приповерхностной, съемки продольных (P-) и поперечных (S-) волн, что продемонстрировано с использованием умеренно сокращенных хронографических (время и скорость) данных ультразвукового изображения (1 МГц). Рассмотрен



случай инфильтрации разливов водного и неводного происхождения, особое внимание уделено разливам ископаемого топлива. Последние оценены в пределах приповерхностной геологии с точки зрения возможных сложностей взаимодействия жидкостей и окружающей среды, которые экспериментально моделируются в виде компонентов потока несмешивающегося вытеснения. Такие процессы широко изучаются в различных областях, в частности при геоэкологическом становлении поля в ближней зоне, инженерии, включая экологические аспекты, а также геокатастрофы. Для лучшего понимания проблемы наряду с соответствующей теорией, достоверной методологией и выводами в статье представлены интересные актуальные сценарии, в том числе вопросы геологической сложности хорошо известных географических мест, влияние на них различных естественных или антропогенных стрессовых факторов. Подробно объясняются экспериментальные аналоги и геометрические ограничения. Ультразвуковые Р- и S-волны и аналитически проверенные данные в актуальном контексте получают всестороннюю оценку. Данные об S-волнах не только подтверждают набор признаков данных Р-волны в пространственно-временной локализации смещенной фазы, включая «тусклое пятно» (что является интересным признаком, соответствующим границе раздела (смешанная фаза)), S-волны также проявляют другие упругие и термомеханические характеристики того же свойства. Далее автором был подтвержден расход, в частности расход нагнетания, а также контроль или зависимость запланированного процесса вытеснения, например в маркерных и коррекционных исследованиях (при необходимости). Предполагается, что пригодность характеристики S-волн для выявления других особенностей взаимодействия систем «жидкость – жидкость» и «жидкость – твердое тело» в микро- и, возможно, в наномасштабе (например, амплитудные эффекты) будет иметь значительные перспективы.

Ключевые слова: комплексное геофизическое картирование, комбинированные приповерхностные съемки, интеграция продольных и поперечных волн (Р-волн и S-волн), ультразвуковая характеристика

Благодарности: автор благодарит за поддержку докторов наук Стивена Д. Батта и Чарльза А. Хьюрича (Мемориальный университет Ньюфаундленда, Канада) в разработке различных геофизических анализов в ходе аспирантских исследований, а также признателен за поддержку Совету по естественным наукам и инженерным исследованиям Канады, компании Петролеум Ресеч Ньюфаундленд и Лабрадор, Канада.

Для цитирования: Хассан Б. Оценка эффективности интегрированных исследований продольных и поперечных волн с помощью ультразвука // Науки о Земле и недропользование. 2022. Т. 45. № 1. С. 8–33. <https://doi.org/10.21285/2686-9993-2022-45-1-8-33>.

Introductory background and motivation

Monitoring of the Earth's surface and near subsurface is essential for understanding several geo- and dynamic processes. Non-destructive applications offer efficient and economic methods to achieve this goal, and interest especially in such applications is much renewed due to need for better understanding of or exploring geo- and environmental degradation and other disasters linkage to climatic changes among other situations of concern, especially in real time. A noticeable and well known cause of many environmental problems of near surface are light aqueous and non-aqueous subsurface flows due to fluid spills and incidental releases i. e., industrial strong brines and light hydrocarbons, resulting at times in complex and sediment degrading fluid fronts and interfaces while acting as solvents too.

Such occurrences are not uncommon in urban development when various kinds of industrial material products, especially by-product and / or waste, for example as in mining, and oil and gas transportation, are inappropriately handled or disposed. The immediate hazard associated with such events is usually of thermo-chemical nature.

The situation however may evolve and worsen if the hazard effect may be compounded when such saturants not only pose risk of soil and water contamination, but may alter the geo-mechanical and morphological characteristics of, especially immediate, surrounding sediment through physico-chemical interaction. The characterization and remediation of such flows usually explicable by porous-media problems becomes even more challenging when the contaminated sediments, already a complex environment, are further exposed to other disasters either as (i) natural and / or (ii) anthropogenic events, such as water events of rains and floods, earthquakes and aseismic effects of industrial activity.

Such interactions may induce ground deformation as abrupt ground movement or creep sufficient enough in magnitude to instigate local subsidence or sliding and erosion effecting civil infrastructure integrity, on one hand, alongside also affecting and extending overall environmental contamination and pollution foot-print and stressing further of restorative economics, on the other. Sediments with fluid contaminant percolation, thus, either exposed to different extrinsic anthropogenic and meteorological natural events



effects, or prejudiced by the complex intrinsic predisposition for pre-existing geologic stressors, hazard associated with porous flows of toxic releases and flows due to either type of, usually connected, cases is quite complicated with both physical and chemical dimensions. Reliable characterization for appraisals, on sound technical grounds, of the overall risk is equally challenging. Efficient and reliable monitoring and forecasting for realizing robust procedures of containment and mitigation of such flows and associated hazards, especially when several levels of ensuring safety (i. e., operational, procedural) fail to curtail frequent occurrence, or consequences, of such hazardous incidents, appear as indispensable.

For a more interested reader relation and connectedness between natural agents and forces constituting complex regional geology in long time scales, and those associated with short time scale seasonality of seismic / geologic, climatic and weather, including aseismic and other anthropogenic, events simultaneously acting towards effecting and altering subsurface sediment's strength and integrity is understandable from, a suitable, example, regarding some above said effects of Italian geology and subsurface. Only brought to attention for historical significance, and out of personal interest, Italian geology at all continental, regional and local scales could be considered well fitting real life situation of complex geo-system, also well studied and recorded as both geo- and enviro-stressed at different time scales. Italian geology for it's genesis towards existing constitution, owes for most part, in nature to the same regional processes consistent with the morphing of the geology of the Mediterranean region, marked particularly with, spatial, occurrence and recurrence of significant local geological events at different time-scales and spans. These agents, namely, historically also well studied, in terms of a time-magnitude scale are of the nature of continental rifting, tectonic dynamics, subduction with regeneration, folding and mountain building, faulting and seismic actions or earthquakes and consequences, as of [1] and [2], meaning also that consequent geological system can persistently not be characteristically tabular and flat, and further not dormant or stagnant but active. Aside from contribution of purely regional level generative,

morphing and reproductive agents and / or aspects, there could be non-regional or relatively local events affecting geo-system complexity. They can further transform a geological system and hence also the corresponding geophysical signature acquired, compared to the regional background. For most part such agents constitute meteorological events as rains, stream flows and floods with impacts especially of recurrence and seasonality in conjunction. Such local events with existing prevalent influence of anthropogenic (or anthropic) activities related to urbanization, agriculture, civic and industrialization directly or indirectly appear to control surface morphology and geohydrology, while effecting also the subsurface saturant's mode both of occurrence and existence, and in composition concentration and pathways / pattern of their flow. They, in short, influence the so called near surface as various actions too, as identified by [3] and [4].

Industrialization driven anthropogenic effects (also defined as anthropocene effects) upon near surface, in addition and combination with natural effects, could create significant geo-environmental impacts unnoticeably, long term. For example, examining the exemplified situation of Italy further, industrial activities with population increase from 1950 through 1980 affected, a variety of native geology and geo-morphology by creating a complex of geo-environmental problems in near surface. In this regard Po valley had been especially and significantly affected, polluted, as reported mostly for inorganic chemicals and radicals contamination of subsurface. Adverse groundwater contamination associated geo-mechanical affects had been reported in the case of central and southern Italy, characterized by local sliding and subsidence, assisted by excessive ground water abstraction [5]. Further, ground water contamination and flows controlled by cyclical seawater intrusion events as being a cause of ground or land deformation or movement of shallow subsurface is also identified by [6].

In addition to issues of purely geological and geotechnical nature, as highlighted through an arbitrary example that of Italy, the concern also over extended geo-environmental foot print of almost existential nature, with specific reference to ground water quality, has dramatically risen globally. Opposed to emergency type responses,



emphasis on appropriate policy development and procedures for establishing long term solutions / capabilities invites attention. In this regard availability of quality water referred to as a direct collective development indicator for the next and rest of this millennium clearly and alone signifies the need to attain efficient and reliable capabilities for near surface monitoring of hazardous flows and ambient sediment / strata and aquifers for conservation, preservation and restoration¹ [7]. Several examples of such occurrences in North Americas both on land and sea could be cited and explored but are considered beyond scope, since the discussion largely in essence has been kept as conceptual extension of subject matter and analyses in²; however recent initiatives and interests could be reviewed from^{3,4}, and further a broader and simpler grasp of major and relevant geo- and environmental processes of concern could be sought from [8–11].

The overall, to this point clarified, and understandably, potential of the hazard associated with near surface saturants and releases is contingent upon their possible mode of existence and / or occurrence whether confined or mobile and also upon concentration and volumes, so it comprises both of qualitative and the quantitative effects. Among qualitative, predominantly physico-chemical and time dependent effects of geotechnical consequences or nature may cause triggering of failure of any dormant, seemingly stable, structure and feature or bedrock. Aspects of such effects upon sediments could be understood from [12].

Non-invasive geophysical mapping for monitoring of the subsurface as a method is well understood and established for technical feasibility. It since vouches capability of inescapably capturing influences of a complex geological ambience due particularly to possibilities and consequent effects of anthropocene activity of industrialization, consumption and affluence within expanding metropolitan habitat and housing. The seemingly reliable non-invasive mapping, however, becomes

ironically challenging and elusive if the applied technique is unable to unambiguously resolve and map the subsurface object and target or process of interest, with all constituent elements, despite detectability. Mapping of subsurface, since, given the crux of subsequent discussion too, refers not only to identifying and delineating all physical features of interest related both to an anomalous structure and that of existence of contained or entrapped fluids or solvents given uniform background geology but also towards gaining further insight. It includes information about dynamic behavior of structure under external stimuli such as, exemplified hitherto, especially external stresses of mechanistic origins and any changes in flow either in pathways or regime and flow components in chemical constituents or fluid-structure morphology i. e., fluid fronts or boundaries and interfaces etc., in relevance to overall fate, respectively. Measurement or extraction of accurate geophysical data attributes and patterns and their space-time correspondence to underlying anomalies is central, in gaining a geological description sense, and to also arrive at a structural understanding where specific patterns i. e., images, are anticipated to directly confirm size, orientation and geometry of the flows types and paths, or conversely and additionally offer an improved lithologic understanding to infer whether a single phase or multiphase subsurface flow would be detected, with other possible details of constituents.

To summarize, the objective is to present findings of a laboratory scale non-destructive process evaluation and imaging study and examine the integration of geophysical data to assess viability of combined P- and S-wave surveys in near surface. The motivation on theoretical side is drawn upon need for monitoring and containment of oil and brine spills and releases related to petroleum or hydrocarbon production processes. The process of interest simulated, to recall, was an immiscible-displacement for it's applicability

¹ Water is a pre-requisite for all development: World Water Council position paper on water and the Post-2015 framework. *Worldwatercouncil.org*. Available from: https://www.worldwatercouncil.org/sites/default/files/events/2013_10_09_Budapest_Water_Summit/WWC_Position_Paper_on_water_and_SDGs_Final.pdf [Accessed 24th December 2021].

² Citation removed as of initial review policy.

³ Contaminated sediment remediation. Guidance for hazardous waste sites. *Semspub.epa.gov*. Available from: <https://semspub.epa.gov/work/HQ/174471.pdf> [Accessed 24th December 2021].

⁴ Managing contaminated sediments. *Serdp-estcp.org*. Available from: <https://www.serdp-estcp.org/Program-Areas/Environmental-Restoration/Contaminated-Sediments> [Accessed 24th December 2021].



not only to several aspects of geo-energy systems but also to much beguiling deformable porous-media-flows macro and micro-scale implications in several realms especially geo-environment. The integrated methods approach in such circumstances is envisioned to be viable, since stimulation and / or energization in two different ways i. e., polarizations, phenomenologically measures (a) different sets of properties over the same or comparable spatio-temporal domain and (b) provides reliable and abundant information compared to that of even individual data sets combined acquired at different times in statistical terms and may help infer (c) aspects which would be difficult to grasp in individual observations of different and multiple data. Such integrated arrangements, with existing technologies as evolving and becoming less expensive, are achievable without significant extra efforts / costs incurred compared to the value of anticipated outcomes. Challenging possibilities of integrated geophysical near-surface monitoring applications and techniques for the future, as they are ever evolving and expanding, are being concurrently tested and put into practice. Broader and detailed relevant accounts, for further reading, of such possibilities and implications, applicable at different scales, could be sought from [13], and also [14, 15], and references therein.

Apparatus and method

The experimental simulation exercise, in a geological concept sense, would also imitate such occurrences as complex of near surface caused due to incidental fluid release or infiltration of aqueous and non-aqueous solvents. Three, in this regard, full scale integrated non-destructive measurements, disregarding dry runs and other experimental tuning, led to acquisition of substantial amount of data. Experimental tuning involved standard (velocity) measurements with water, different rock samples and empty (core) tube given performance / statistical characteristics of sensors to determine and confirm adequacy of received signal strength and realistic picking of wave-form first arrival travel times, as analog pre-amplification before digitization was also employed to improve acquired signal. The results offered an adequate detectability and reliability for all examined data. Significant correlatable

similitude since was observed in achieving distinct spatio-temporal localization of pure phases or saturations of (i) oil and (ii) brine, and importantly (iii) an interface or a mixed-zone with associated fluid fronts was also unambiguously identified against the background matrix. The physical simulation exercise as it involved displacement of oil by brine the global flow was controlled and developed directed vertically against gravity through a porous unconsolidated medium / sediment analogue at fully saturated constant head conditions, i. e., Darcy regime. Two main apparatus components were designed to be used to facilitate and realize different types of data acquired essentially as integrated. One piece of apparatus consisted of an instrumented vertical transparent PVC tube with 5.09 cm inner diameter circular section i. e., a flow-cell system, to house and confine sediment core, connectable to the second piece of apparatus, a flow control system for saturating the flow cell analogue and especially maintaining invading fluid flow rate at constant head conditions. Pictures of laboratory arrangement of the apparatus components to enable understand the functioning of the two components with underlying concept are shown in Fig. 1. The analogue for unconsolidated sediment core was 0.5 mm spherical soda lime glass bead-pack (or granular pack) confined inside the flow-cell in 45 cm long section of transparent tube oriented and secured vertically. For acquiring ultrasonic data, 1 MHz P- and S-wave, source-receiver diametrically mirroring sensor pairs, were positioned mid-span flow-cell orthogonally, respectively, at flat machined seats to establish perfect contact for through (pulse) transmission. The arrangement allowed an adequate sampling or measurements for maintaining a reasonable spatial and temporal resolution during imaging of the fluid-displacement for any pre-selected invading fluid flow rate. The flow-control system was externally powered by a 1.5 hp centrifugal pump to keep fluid vessels remain filled. A regulated fluid flow through the granular sediment analogue within the flow cell against gravity was ensured with control valves provided at the top and bottom end pieces of flow-cell system and with allowance for raising and lowering of the fluid containing vessels of flow control system along the vertical holding stand.

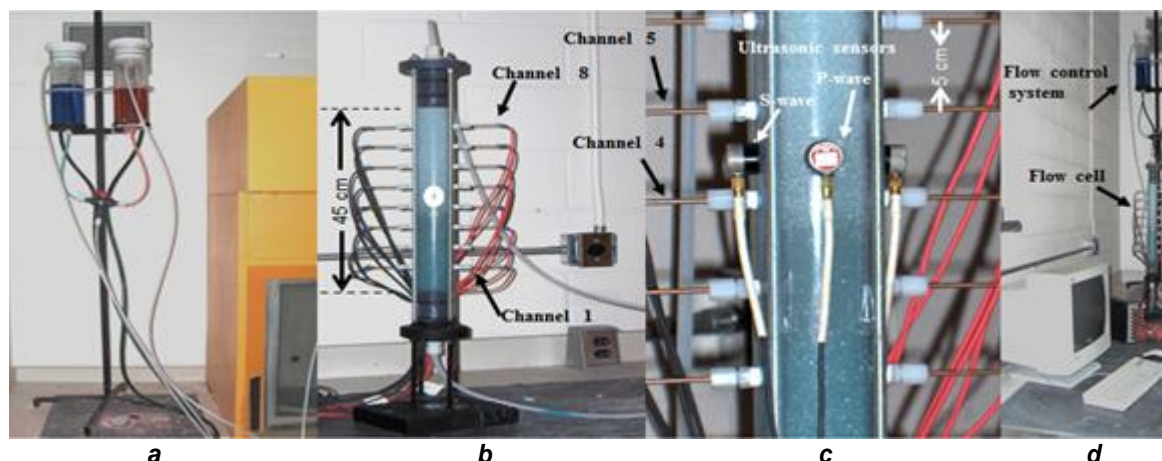


Fig. 1. Laboratory arrangement of the apparatus components:

a – constant-head flow control system showing oil phase and brine phase reservoirs with different dyes for visual discrimination in an initial test; b – flow cell system containing or forming the granular core (instrumented) analogue firmly held with tension rods anchored on a fixed aluminum pedestal with adjustable damping or isolating feet (not shown); c – close up snapshot of 1 MHz source receiver sensor pairs in through transmission configuration; d – flow control system and flow cell system connected to data acquisition system imitating bench top immiscible fluid displacement arrangement

Рис. 1. Организация компонентов оборудования в лаборатории:

а – система управления постоянным напором, демонстрирующая резервуары с нефтяной и соляной фазами, окрашенные разными красителями для визуального отличия в начальном опыте; б – система проточной кюветы, содержащая или образующая аналог гранулированного сердечника (оснащенного контрольно-измерительной аппаратурой), прочно удерживаемого натяжными стержнями, закрепленными на неподвижной алюминиевой опоре с регулируемыми демпфирующими или изолирующими ножками (не показаны); в – снимок крупным планом расположенных парами датчиков «источник – приемник» с частотой 1 МГц в конфигурации сквозной передачи; д – система управления напором и система проточной кюветы, подключенные к системе сбора данных, имитирующие устройство вытеснения несмешивающихся жидкостей

The overall physical with procedural arrangement enabled predetermining reasonable initial flow rate/s controlled at constant head conditions to allow sufficient amount of time, given the length of sediment analogue section and sensor positions, for all possible phases, flow types and / or morphologies (i. e., pure fractions and interface evolution), of interest to fully developed before being imaged. End pieces secured and aligned with steel tension rods in place restrained, as shown, the sediment analogue in the flow cell tube as they were held in sufficient tension to also allow structural stability while stressing and compaction of the granular / bead material for achieving sufficiently stiff grain to grain contact and keeping the flow-cell tube mechanically isolated and relaxed. Tension rods were anchored to an aluminum tetra pod pedestal or base-plate, 19.5 × 15.5 × 4 cm in dimensions, with leveling screws at each corner to allow perfect leveling, stability and damper footing pads (not shown) to reduce effects of ambient noise in acquired signals. A flow disc seated or rested next to and covered 1cm round center bore hole

of each end piece inserted in place at bottom and top of flow cell tube, while secured between the granular material and end piece insert. On each of them were provided grooved and perforated flow channels designed as radiating from the center of, and towards, perimeter (circular) while covered by a mesh. Flow-disc as for its design, and mesh covered, would act as a granular material retainer, and also ensure steady uniformly distributed inflow or outflow of fluids without shock effects. Two continuous circular sealing rings about 3.75 cm apart provided at the middle of the 9 cm long end piece shaft or insert would be pressed between the outer surface of end piece insert and interior of the tube to allow a unidirectional flow only and keep the end-piece appropriately oriented in place. The developmental and adaptation aspects of the ultrasonic data acquisition system for various applications can be sought in [16] and [17] with other references therein. Three experiments with different initial / invading flow rates, explained further, with preplanned control, were considered adequate for analyses, alongside others performed as base line measurements, as



indicated. Developing transparent reservoir / core analogues or apparatus arrangements in concept assists in visual examination for attaining better tuning and calibration. Use of such apparatus for examining fluid phases or fluid flow processes for laboratory experiments, in historical context, could be understood reported by [18] and [19].

Theory of controls and mode of integrated measurements

In this section the aggregate of ceramic beads or grains forming the analogue of unconsolidated sediment core is discussed in a phenomenological sense based on some known and established theoretical conventions or considerations. Further including also the geometrical and topological aspects these considerations are imperative in assessing physical properties, in addition to characteristic behavior, for experimental design as at hand. It is also understood and assumed held that both the (a) space and (b) time restricted, say displacement, velocity and acceleration associated responses are translated towards acquired measurements or signals. Amongst them meaningful signal attributes can be inferred as self-descriptive images for determination of an existing state, while examine either individually or combined, which otherwise would be onerous to be determined analytically. In this regard, aspects or possibilities of intergranular contacts, nature of internal forces and packing effects in dry and saturated state, in response to an external stimulation sense are elucidated, and only seminal works are afforded upon discretion.

Apparent Parametric Constraints for Granular Packing. Certain ssituations such as unconsolidated land and ocean porous sediments and comparable materials can be conveniently considered analogous to or depictable by an assemblage of grains or beads. These sediments further could also, while being subjected to or in interaction with localized external forces of nature and similar agencies, in response behavior considered as comparable to a confined static pack as if undergoing a shaking caused repeated packing type organization (and / or re-organization) of constituent elements. Assessments of their behavior are bounded naturally by aspects of granular size range including distribution (if not

uniformly identical), contacts types in geometry and magnitude of area and their variability, contribution of granular surface properties including friction, and local and global fluid saturation and flow effects are also important factors or considerable restrictions of granular material or sediments dynamic description. Further there also is a well observable possibility of an affectation, as hinted, characteristic of an evolution and / or self-organization of granular background medium upon measurements and interpretation, given topology and restricting geometry.

A constant and statistically isotropic, for the case under consideration, porosity of 26 percent for the granular pack considering the number of contacts according to [20] is constantly maintained. The collective elastic (or ultrasonic) response for 0.5 mm spherical soda lime beads is assumed so to be consistent with mechanics of regular arrays and discrete particles following [21]. In addition are also considered and / or brought to attention propositions of [22], including those of [23, 24] and also works [25–28] in similar context. The elastic response for 0.5 mm spherical soda lime spherical beads assemblage or pack is assumed, to be also explicable following well known Hertz and Mindlin theories, sufficiently adequate for a satisfactory description of overall oscillatory / dynamic behavior, i. e., velocities, amplitudes and other characteristic possibilities. Kepler conjecture as of [29], and further bounds defined by [30] for packed isolated spheres, without any points of contact being (theoretical restriction of size change) coincidentally common, is assumed held. Furthermore all grains are assumed equal spheres, as with no dimensional overlap, falling within the possibility of forming a cubic and / or a hexagonal random closed packing with sufficient and / or relevant maximum number of contacts. The possibilities of nature of contact forces experienced by granular sample array upon external stimulation, given types of contacts, are illustrated in Fig. 2 and Fig. 3. Acoustic scattering and geometrical / spatial diffraction since might create, other, subtle but significant effects as brought to attention by [31] and [32] in such materials / situations. Effects of diffraction in elastic wave propagation through saturated porous media are discussed in detail by [33] and [34], to understand the phenomenon.

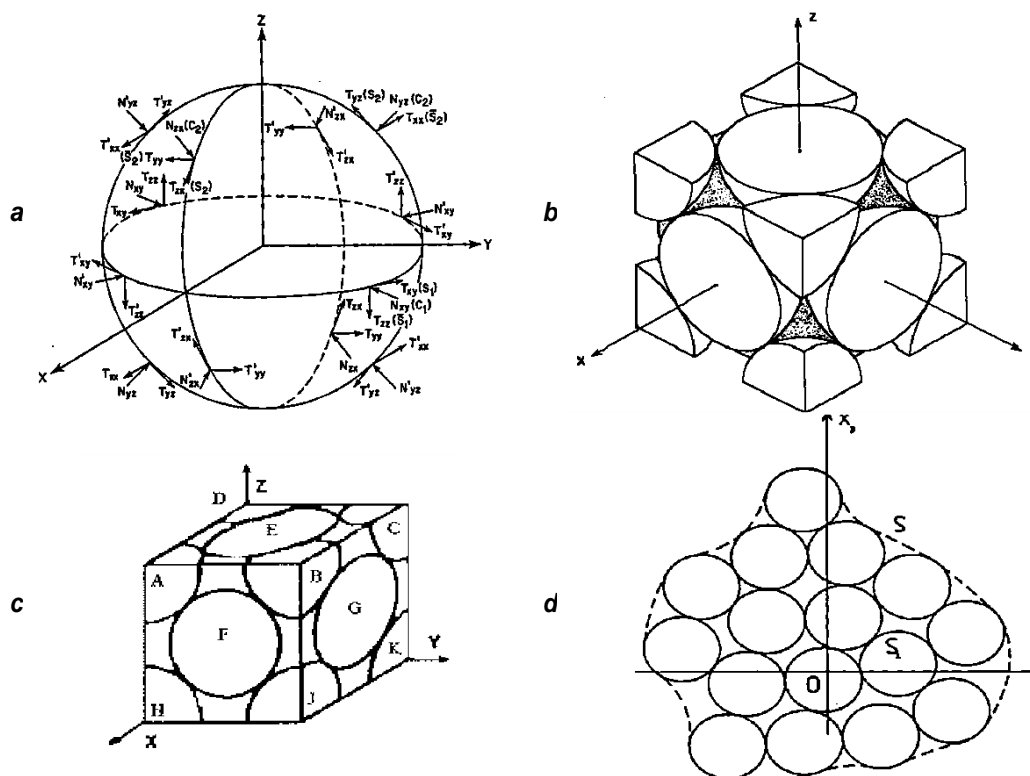


Fig. 2. Possibilities of forces acting on a single grain surface, and within a representative equivalent volume:

- a – direction of various contact forces acting upon a typical spherical grain [23]; b – arrangement of spheres in a face-centered cube [22]; c – element of volume of face-centered cubic array of spheres; d – a random set of spheres within a large number bounded by a surface under stress [24]

Рис. 2. Возможности сил, воздействующих на поверхность одного зерна и действующих внутри представительного эквивалентного объема:

- a – направление различных контактных сил, действующих на типичное сферическое зерно [23]; b – расположение сфер в гранецентрированном кубе [22]; c – элемент объема гранецентрированного кубического массива сфер; d – случайный набор большого количества сфер, ограниченный напряженной поверхностью [24]

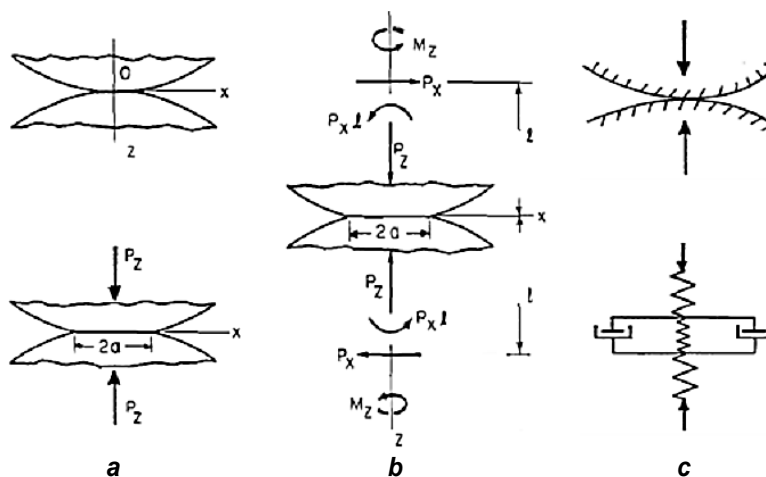


Fig. 3. Nature of contact forces experienced by granular sample array upon external stimulation:

- a – nature of granular contact unstressed free and under normal force; b – intergranular contact under pressure [22]; c – granular contact in presence of saturant represented with a rheological model [25]

Рис. 3. Характер контактных сил, действующих на массив гранулированных образцов при внешнем воздействии:

- a – характер ненапряженного зернистого контакта и контакта под действием нормальной силы; b – межгранулярный контакт под давлением [22]; c – зернистый контакт в присутствии насыщающего агента, представленного реологической моделью [25]



This implies that ray theory holds in acoustic arrival time and velocity estimates. However, when analyzing the amplitudes or energy variations, diffraction effect and its consequences may dictate or merit observations beyond spatio-temporal localization / description of object or phenomenon of interest additionally.

Other salient delimiting aspects would be the geometry of space of confinement, degree of confinement, quantity, size, and arrangement of the granular constituents i. e., grains or beads, especially in ray path, effecting and contributing to the static component of the observations. For any unique investigative method applied to, especially non-destructive, and / or energies propagated through the process of interest and inferred reliably, understanding of restrictions of illumination of the targets and / or that of method itself holds importance. For example in through transmission of ultrasonic energy, non- and contact coupling options are available usually, with different arrangements of application. For the type of experimental arrangement, static and fixed or grounded, both gel and permanent glue couplants types were tested to determine and understand the bearing of nature of coupling on the morphology of acquired signals in terms of consistency, adequacy and quality. Permanent glue type adhesive was chosen and used as couplant between sensor and flow-cell finished surface offering a firm contact an uninterrupted continuous acquisition for several hours in any given experiment.

Surface Tension and Fluid Micro Structure Aspects. Liquid droplets, when exposed to atmosphere tend to acquire a particular shape, and this behavior is controlled by the physical properties of a given liquid. Water drops for example are uninfluenced by gravity effects at times as they do not collapse, and flow and spread on a surface i. e., non wetting. They appear to contract themselves to attain a minimum surface area, as close possibly as to a sphere. The reason for this physical behavior is that surface molecules, of a body of liquid, are not as much affected by intermolecular cohesion as those towards the inner part of the volume, for instance as in the case of water. The restriction of attaining the minimum energy of equilibrium results not only in formation of minimum surface area but causes surface molecules

hold tightly together, spontaneously, as if in tension. This phenomenon is called surface tension, as well known. Surface tension is defined usually as forming of an interface by liquid surface exposed to or in a "contact" with atmosphere (atmospheric conditions) only, shown in Fig. 4. When both phases are liquids however, understanding of an interface happens to be different by definition. When water, again for example, is placed in direct contact with oil, the contact interface formed would have a contractile tendency. Contractility implies acquiring a minimum area with a definite molecular arrangement and orientation given their (chemical) properties and type. Orientation specifically of dipolar nature of molecules occurs at an interface when, as a specific example, the hydroxyl group, say, of an alcohol molecules would immerse in water to form and interfacial layer. The interfacial layer between two fluids is at times termed, or rather could be a, monolayer. Free surface of a liquid fluid, so, could in behavior be deducibly understood as layer with tensile or elastic properties. Physical existence of such elastic stress is difficult to realize, since, the dimensional restrictions, though well constrained, of mathematical formulation, does not clearly, support and allow convenient grasp. Existence of such interfaces is reported to persist (without ready dissolution or diffusion) even while undergoing deformation and is argued to occur by an energy equilibration caused due to a mutual exchange or cross-transfer of low and high energy molecules from free (i. e., Helmholtz free energy) surface and bulk volume energy of fluid, concurrently, with the meanings of providing for a chemical potential balance. Such propositions and possibilities are depicted in Fig. 5. Further such equilibration to occur could be understood considering the kinetic molecular theoretic. Fluid bulk phase could be considered at rest while molecules in an agitated state of motion assume several possibilities of effecting entropy given when interfacial molecules have a different liquid in property or state on either side the monolayer.

Total surface energy is considered greater than the free surface energy on grounds and definition that it is excess of the potential energy possessed by the number of molecules within the bulk phase when compared to same number of molecules forming a surface. Arguments point

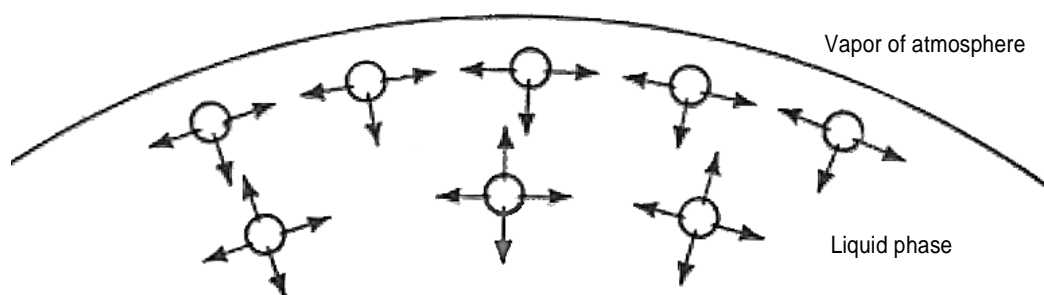


Fig. 4. Surface tension phenomenon depicted with possibilities of intermolecular forces and their orientation [35]
Рис. 4. Явление поверхностного натяжения, возможности межмолекулярных сил и их ориентация [35]

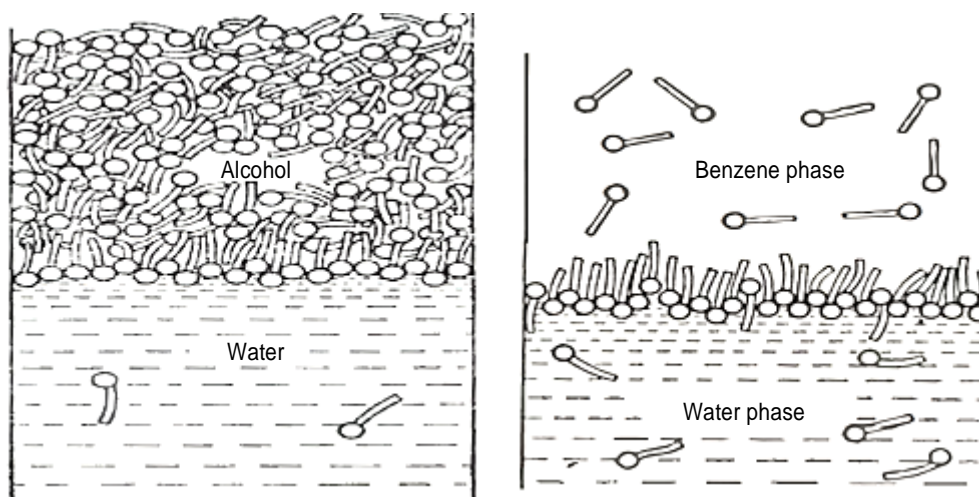


Fig. 5. Depiction of interfacial monolayer formation with molecular orientation and possibilities of motion for electrochemical equilibration for two water based bulk immiscible systems modified [35]

Рис. 5. Изображение формирования межфазного монослоя с молекулярной ориентацией и возможностями движения для достижения электрохимического равновесия для двух объемных модифицированных несмешивающихся систем на водной основе [35]

to a unit basis of dimensionalities of Helmholtz free energy definition. Adding to the above, monolayer is also propositioned to have strength properties, both of compressive and shear strength, indirectly confirming to assume elasticity. Compressive and shear strength properties have usual meanings, however shear strength is understood as capability of withstanding the torsional effort, as if, by concentric circular layers. Two very important consequences of these properties are that monolayers including immiscible interfaces have capacity to retain structure and significant wave damping capacities. It is clearly understood that both fluid molecular concentration in type (density effect) and the surface lubrication aspect (viscosity effect) should cause observable wave (thermodynamic) damping. Reported findings of other studies however suggest that it is difficult to ascertain which parameter may control or is responsible for maximum damping. Viscosity appears to affect a drag type effect

too in monolayers formation and deformation, and further a direction and frequency dependence of any stimulated-wave damping is deducible, given manner and implications of measurement methods.

On each side of the interfacial immiscible monolayer different liquids should occur, and the molecules of those liquids would have tendency to be attracted to each other, both like and unlike molecules. Cohesion defines the force of attraction between like molecules while adhesion is that between unlike molecules. If the force of attraction between unlike molecules surpasses that of like molecules, it introduces miscibility, as surface energy is naturally minimized further. A work of adhesion is defined as the force per unit area required to overcome the cohesion, where work of cohesion with similar conceptual meanings and dimensions for a single liquid is twice as much as its surface tension, as two propositions are slightly different. In energy terms thus complete



miscibility occurs when work of cohesion approaches a minimum. A conceptual mechanism of exchange of work for miscibility is shown in Fig. 6 where a stable, and agitated or moving mixing oil-water “immiscible” interfaces are shown side by side. Such energy exchange is speculated to occur by local or eddy flows within global flow involving momentum exchange. For specific and clear appreciation of wettability and affinity of different phases of an immiscible process or system, contact angle is the primary, if not the only parameter.

A simple pictorial definition or concept of contact angle is shown in Fig. 7. The variability in contact angle is an indirect measure of degree of variability between cohesion and adhesion. Changes of cohesion and adhesion since determine degree of miscibility or immiscibility, and consequently effects of saturant mobility given material property variation restriction of the energy variation, for conservative principles. Wettability has a greater significance in case of a three phase system, for example, where solid phase is also involved, and several parameters and their interaction in a complicated manner affect the

consistency of the solution or mixed phase. Most of discussion in this section follows, excerpts and concepts from [35] alongside several pictures for relevant illustration. Other references therein are not explicitly cited and explained for brevity.

Aspects of Global Fluid flow. In experimental simulation, under consideration, conceptually a light non-aqueous phase liquid or oil fully saturating sediment is being displaced by brine against gravity, in each of a set of three experiments, to recall. Given, so, the manner of fluid confinement in the sediment analogue, the identical parameters of physical and chemical nature of the two different fluids, the invading and invaded phases, naturally happen to be significantly apart in magnitudes. Such a choice also facilitates better observation and clear appreciation of their effects on the acquired data, especially when inferring requiring a comparative analysis. The gravity, since, of oil phase when pure and / or free bulk state is 0.761 with viscosity of about 10 cp compared to gravity of brine being 1.03, which with the salinity of 3.5 % simulates sea water with assumed viscosity of 1.3 cp, to be able to create an inviscid flow. It thus could be speculated that

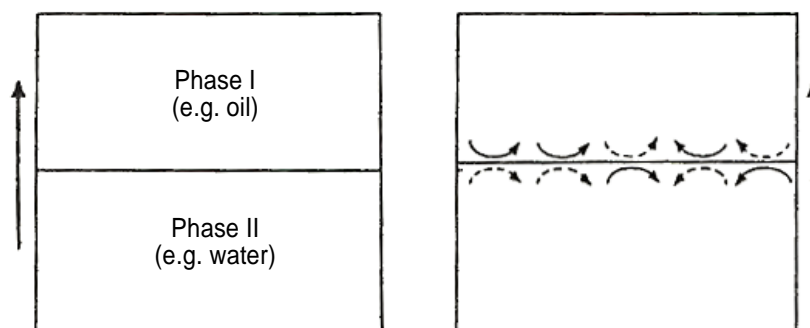


Fig. 6. A stable and unstable immiscible bulk oil-water interface [35]

Рис. 6. Стабильная и нестабильная несмешивающиеся границы раздела нефтепродуктов и воды [35]

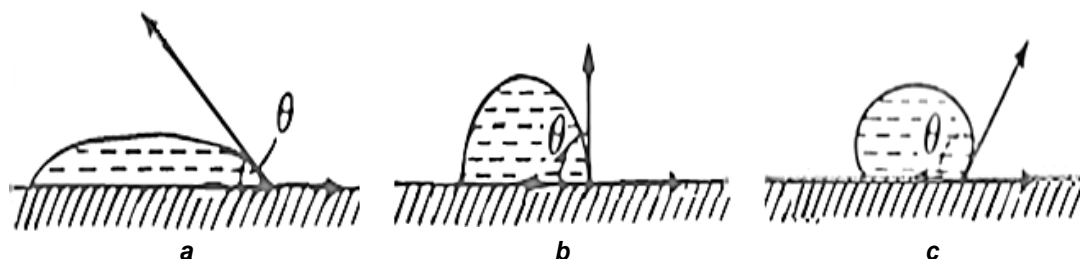


Fig. 7. Contact angle “ θ ” as a measure wetting by spreading of a fluid on solid surface:

a – low contact angle showing preferential wetting comparable to hydrophilic in an aqueous case; b – a higher contact angle showing less spreading; c – very high contact angle depicts fluid phobia as in hydrophobia modified [35]

Рис. 7. Краевой угол θ как мера смачивания при растекании жидкости по твердой поверхности:

а – небольшой краевой угол смачивания, демонстрирующий преимущественное смачивание, сравнимое с гидрофильным в водном растворе; б – большой краевой угол смачивания, свидетельствующий о меньшем растекании; в – очень большой краевой угол смачивания, указывающий на фобию жидкости, подобную модифицированной гидрофобии [35]



effects of variability of parameters should be vividly significant, as proportionate effect of viscosity difference i. e., about 75 %, is much pronounced compared to that of density difference apparently, for type of porous / granular confinement, interestingly.

For the physical realization, of immiscible displacement process, the invaded or the “displaced” fluid phase of the process was introduced first into the unconsolidated core analogue of granular pack for attaining complete saturation. It was ensured or confirmed that the saturation was hundred percent and spatially uniform as air was also vacuumed out if required to eliminate any effects of air, bubbles or partial saturation. For creating or choosing the initial flow rates of the displacing or invading fluid phase, to start with, nature of flows similar to that of subsurface were considered, and kept in the broader perspective, to achieve only create realistic flow initiation and an overall morphological imitation, discussed further below. An adequate understanding of the nature of such subsurface flows and measurements assumed being consistent with different subsurface processes can be sought and inferred from work of [36–40]. The flow rates of choice, were, 0.044, 0.11 and 0.64 ml/s corresponding to values of about 4, 10 and 55 L/d defining or identifying a slow, intermediate and a fast flow rate experiment correspondingly. Categorically stated, the chosen flow rate variation range was to or would not only to a large extent fall within the limit or explicable both of soil-seepage type and observed at reservoir scale, or flows measured / observed in near surface aquifer characterization, but would allow reasonable number of measurements taken also well resolved in space-time sense, and anticipated to offer a plausible inferring. P- and S-wave data were simultaneously acquired and it was ensured that any individual single instance of measurement would be recorded by both the P- and S-wave sensors almost at same instant, representing same physical event confirmable also by time stamps of the measurement instances.

Discussion of results

Relative positioning of P- and S-wave source and receiver pairs, connected mid-span of flow-cell length, shown in Fig. 1, *b* and Fig. 1, *c*, clarifies

the manner of acquisition, organization and structuring of the (digitized) data given the geometrical arrangement. It further should enable the reader understand the graphical illustrations presented in the rest of figures. Data, to remind, are organized arbitrarily, however systematically, while taking into consideration and, to enable, an understanding of time delays of successive measurements, alongside organization with summation, done to offer advantage of a 2-D spatio-temporal effect from single point measurements, exploiting and also manifesting the inherent usefulness of experimental design.

Further the method of presentation ensures ready comprehensibility of any individual graphical result (and resultant) in significance, and additionally maintains and preserves the mutual relevance of individual figures of different outcomes in terms continuity of instances or measurements of interest in space-time. Consequently, a reduced contrived or manipulated cross-section of data are presented for complete unambiguous understanding of whole from part. Fig. 8, *a* thus, spontaneously, informs about how several measurements acquired as a sequence in time be presented sequenced in space to create an image of a single point monitored process. In Fig. 8, *a*, so, waveforms of Time 1, Time 2 and Time 3 are single point measurements separated in an elapsed time sense, where each measurement or observation within itself is a dynamic and causal signal. It is clearly observable that three signals or waveforms, that of Time 1, Time 2 and Time 3 depict an arrival time delay and amplitude variations with elapsed time. Signal of Time1 corresponds to oil saturation measurement, Time 3 signal corresponds to brine saturation measurement, both intense in amplitude, and deducibly signal of Time 2 is associated with the mixed phase zone, less intense or dim in amplitude. If not proportionately juxtaposed, and / or examined separately the three measurements would inconspicuously appear alike, hence justification of several of above comments in the discussion hitherto regarding nature of data presentation method applied and that of measurements.

Temporal anatomy of typical P-wave signal compared to S-wave signal for a brine saturated medium is shown, examinable, in Fig. 8, *b* against Fig. 8, *c* respectively within 2.0 ms equal duration.

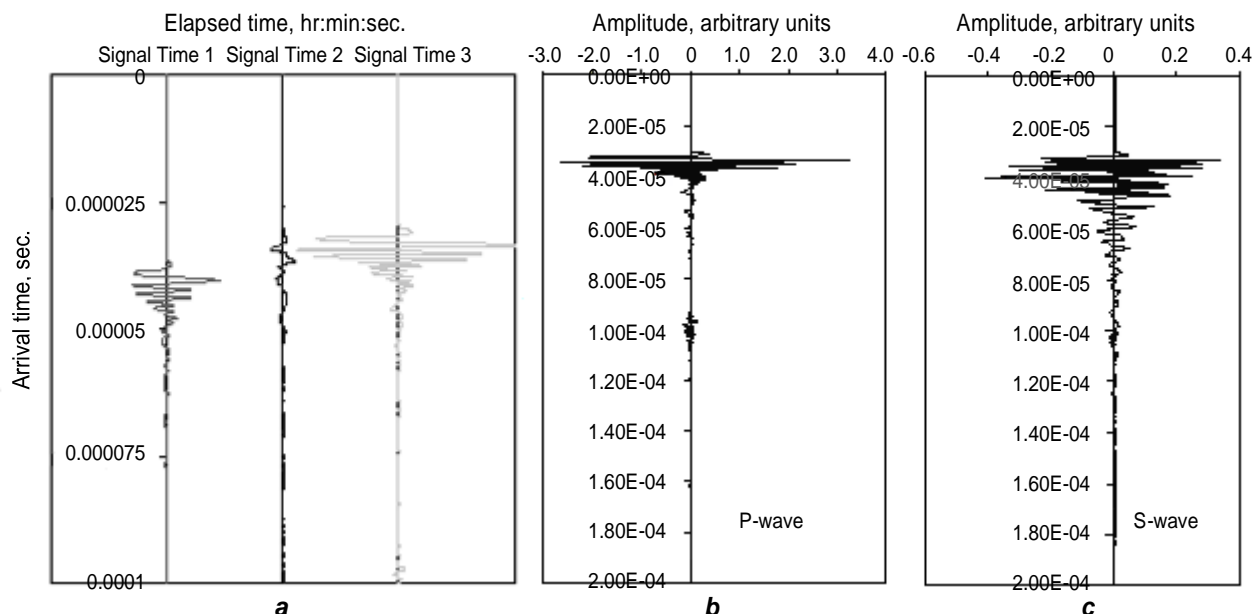


Fig. 8. Times of single point measurements:

a – an example of acquired data structuring to form an image of the process; signals of Time 1, Time 2 and Time 3 are single point measurements separated in an elapsed time sense, where each measurement is dynamic and causal (delays so in arrival time and amplitude variation are also visible); b – anatomy of typical P-wave signal compared to (c); c – S-wave signal for a brine saturated medium within 2 ms equal duration

Рис. 8. Время точечных измерений:

a – пример структурирования полученных данных для формирования образа процесса; сигналы Время 1, Время 2 и Время 3 представляют собой точечные измерения, разделенные по признаку истекшего времени, где каждое измерение является динамическим и причинно обусловленным (также заметны задержки во времени вступления волны и колебания амплитуды); b – структура типичного сигнала Р-волны по сравнению с (c); c – сигнал S-волны для насыщенного рассолом среды в течение 2 мс равной длительности

The difference in the character of signals, as presented, is unambiguously identifiable to discriminate between P- and S-wave measurements. In terms of facilitating detailed examination for inferring, Fig. 8 contents provide two pieces of useful information. Firstly P- and S-waves signals as measurements are reliably “discriminate” and secondly both types of measurements would, and further should, undergo an “arrival-time and amplitude” change respective of and consistent with (i) energy type i. e., compression or shear, and (ii) nature of displacement variations, respectively, i. e., a definite pattern. Such wave-forms constitute chronographs or time-sections, with observably persistent patterns in a distinct and characteristic manner to create “images” descriptive, and allowing the plausible inferring, of morphology of the immiscible displacement process. Fig. 9 is a “close up” and shows pure S-wave mode while identifiable from associated converted P-wave mode, in an experimental verification sense, for reliable S-wave velocities determination and analyses. P-wave mode is usually observed along S-wave mode, mostly in significantly

low but varying intensity. The occurrence is a constant static feature due to the sensing element configuration and working design, while intensity may depend upon, method and scale of survey and configuration. It can sometimes cause challenge in a legitimate S-wave data discrimination and even acquisition if sensor and / or receiver is not understood and deployed properly or sensor configuration or properties are altered, especially in case of low signal to noise ratio case measurements. The received signals since were recorded, and also transmitted by using same type P-wave and S-wave sensor pairs and were discreet; the recorded data were so phenomenologically accurate and truly representative of the events of interest and any irrelevant interference would naturally be filtered out.

Data as of manner presented in Fig. 8, a, allows forming or computing ultrasonogram “images” especially suitable for juxtapositioning and comparisons of individual measurements such as shown in Fig. 10, allowing identification of legitimate anomalies and features, standing out. Important aspects such as arrival time and amplitude

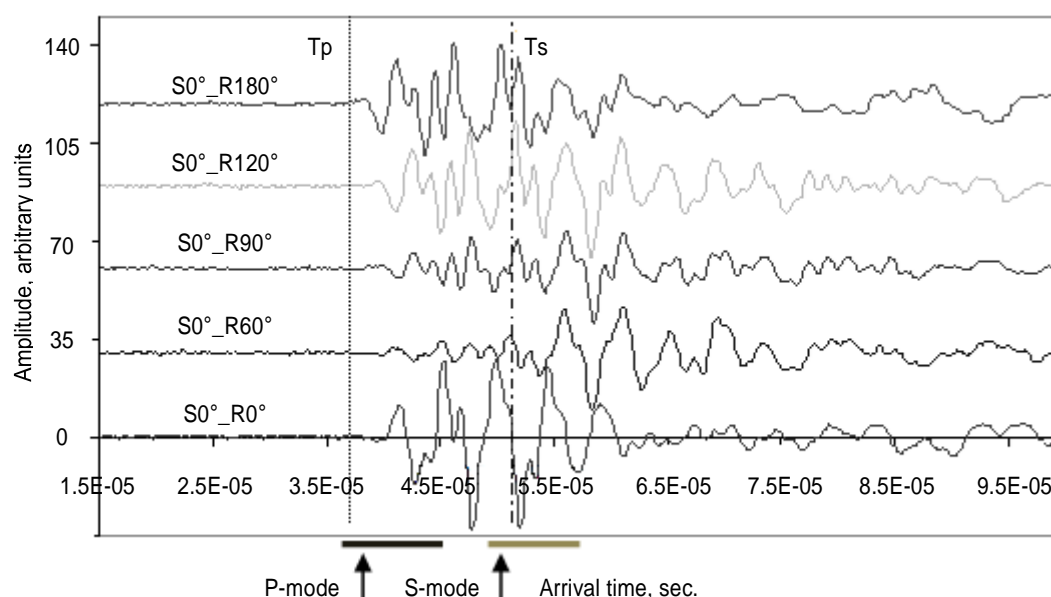


Fig. 9. Demonstration of isolation of P-wave and S-wave modes for time irrespective windowing for detailed analyses

Measurements made by stepwise rotation the receiver R relative to fixed source S.

Note that for P-wave significant first arrival events only change in amplitude but not in polarity, while S-wave events are delayed and undergo both amplitude and polarity shift with some phase effects

Рис. 9. Демонстрация изоляции типов колебаний P- и S-волн

методом независимого от времени окна для подробного анализа

Измерения производятся путем пошагового вращения приемника R относительно неподвижного источника S. Важно заметить, что значимое событие первого вступления P-волны характеризуется только изменением амплитуды, но не полярности, в то время как события S-волны задерживаются и претерпевают сдвиги как по амплитуде, так и по полярности, сопровождающиеся некоторыми фазовыми эффектами

anomalies for example of Fig. 10 are more visibly identifiable for more focused analyses if needed. Each trace or signal shown in any panels of Fig. 10 is time stamped to verify and examine either an independent measurement while also allow follow the progress of the process of interest from corresponding measurement sets or events against elapsed time. In Fig. 10, besides, more distinct anomalies of arrival times and amplitude variations occurrence of a “dim spot” anomaly at elapsed time of 50 min, 5 min and 1 hr instants during Test 1, Test 3 and Test 2 respectively is especially significant.

It is observable that occurrence of relatively low amplitude artifacts before the “dim spot” are different in character from relatively high amplitude artifacts following it. It is conveniently deducible that the former correspond to the flow of the invaded or displaced fraction of pure oil and the latter to the invading fraction or brine in each of the tests. While the dim spot separating the two types of amplitude artifacts should correspond to a certain interfacial region or zone. Repeated observations overall confirm the existence or flow of

two pure phases as oil and brine separated by a mixed phase; providing a basis for a detailed evaluation further to examine other anomalous subtleties more resolvable in velocity i. e., ultrasonic wave velocities, and amplitude examination. Velocities are estimated from the first arrivals or breaks of the P- or S-waveforms or modes in each trace, and the integrated amplitudes for each are calculated as the sum of the rectified waveform amplitudes and are analogous to the total area enveloped under the waveform. The integrated sums are not normalized to avoid any apparent loss of information or statistical obscurity. The individual amplitude coefficients or magnitudes are determined from Eulerian or complex components.

In Fig. 11, a, the ultrasonic velocities variation curves computed on the basis of effective or wave propagation length for all three experimental tests are presented adjacent and together. Given the information of Fig. 10 in hind sight, Fig. 11 shows conspicuous differences in velocities corresponding to the time of existence of oil and brine. There, however, is a marked and

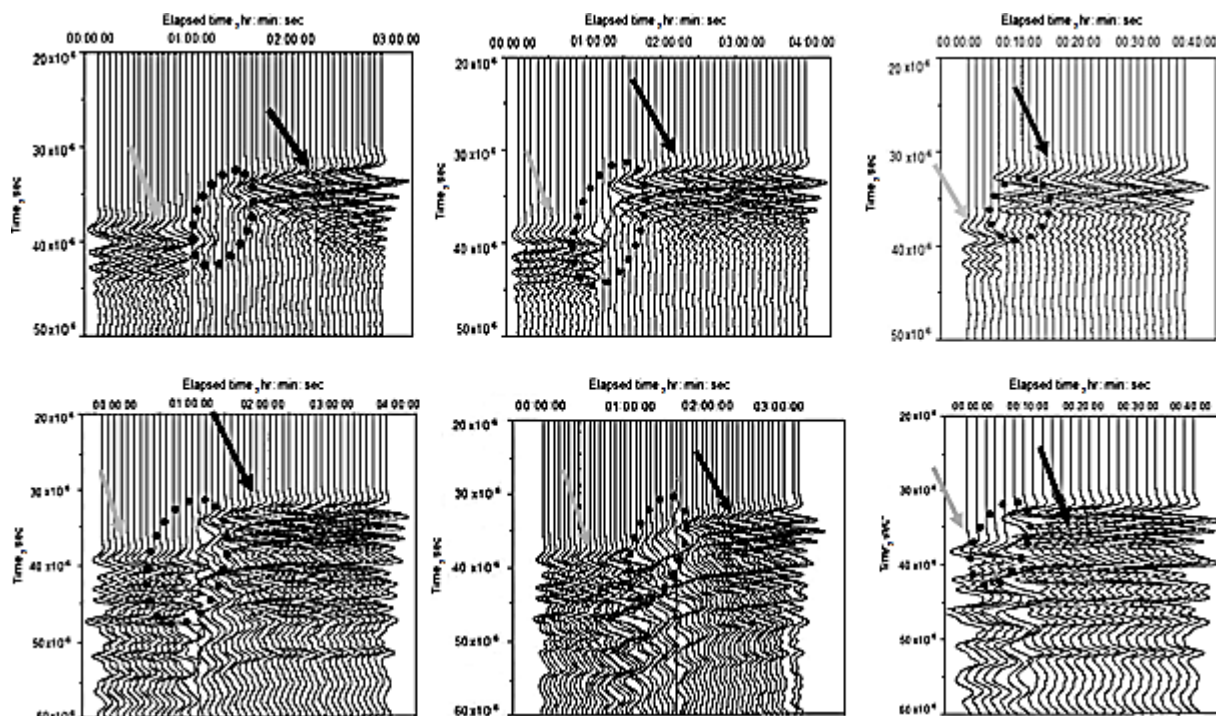


Fig. 10. P-wave (top) and S-wave (bottom) ultrasonograms of three immiscible displacement tests juxtaposed with conspicuous anomalies or features of interest marked (encircled dim spots separating oil and brine flow markers), as other features related to diffraction and interference effects also become contrastingly visible

Left Test 1 (0.044 ml/s), middle Test 3 (0.11 ml/s) and right Test 2 (0.64 ml/s)⁵

Рис. 10. Ультразвуковая сканограмма Р-волны (вверху) и S-волны (внизу) для трех опытов с несмешивающимся смещением, совмещенных с выраженными аномалиями или отмеченными изучаемыми особенностями (обведенные в круг «тусклые пятна», которые разделяют маркеры потоков нефти и рассола), так как другие особенности, связанные с дифракционными и интерференционными эффектами, также отчетливо видны

Левый опыт 1 (0,044 мл/с), средний опыт 3 (0,11 мл/с) и правый опыт 2 (0,64 мл/с)⁵

gradual increase in the velocity at the instances indicating a formation of interfacial zone for all three tests, suggesting an acceleration and / or gradient effect, but not a sudden shift or jump, given specifically the length scales under consideration. P-wave velocity variations, in Fig. 11, a, thus unambiguously and clearly show P-wave sensitivity to fluid density, in addition to background density. A marked, similar, difference in velocities for oil phase and brine phase, following Fig. 11, b, could be readily pointed out in S-wave velocities, respectively. Both wave velocities are at a consistent stable value for the duration of oil saturation, and then begin to increase during the period of mixed phase saturation. Stabilization of the velocities at a higher value indicates the final flow of brine saturation phase. Importantly, in addition, the slope of increase of the velocity in curves, with a significant spread of distribution of well identified individual readings unambiguously

confirm initial speculation of a possible degree of miscibility and its flow rate dependence.

Corresponding, integrated amplitude variation as shown in Fig. 12 fixed identically against an elapsed time provides further insights, especially into the nature of the interface, with further confidence, from a subsurface fluids displacement perspective. Occurrence of significantly low amplitudes artifacts or anomalies collectively confirm a very distinct fluid-fluid boundary or fluid front type interface with a characteristic low energy transmission or high dissipation. Such artifacts of amplitudes variation of Fig. 12 appear straightforward to infer however, similar and those of Fig. 12, b contain much detailed information to be resolved for disambiguation. In case of Test 2, for example, the artifact of significant amplitude loss after a slight increase, much clearly visible for the cases of Test 1 and Test 3, appears to be unidentifiable; however corresponding

⁵ Citation removed as of initial review policy.

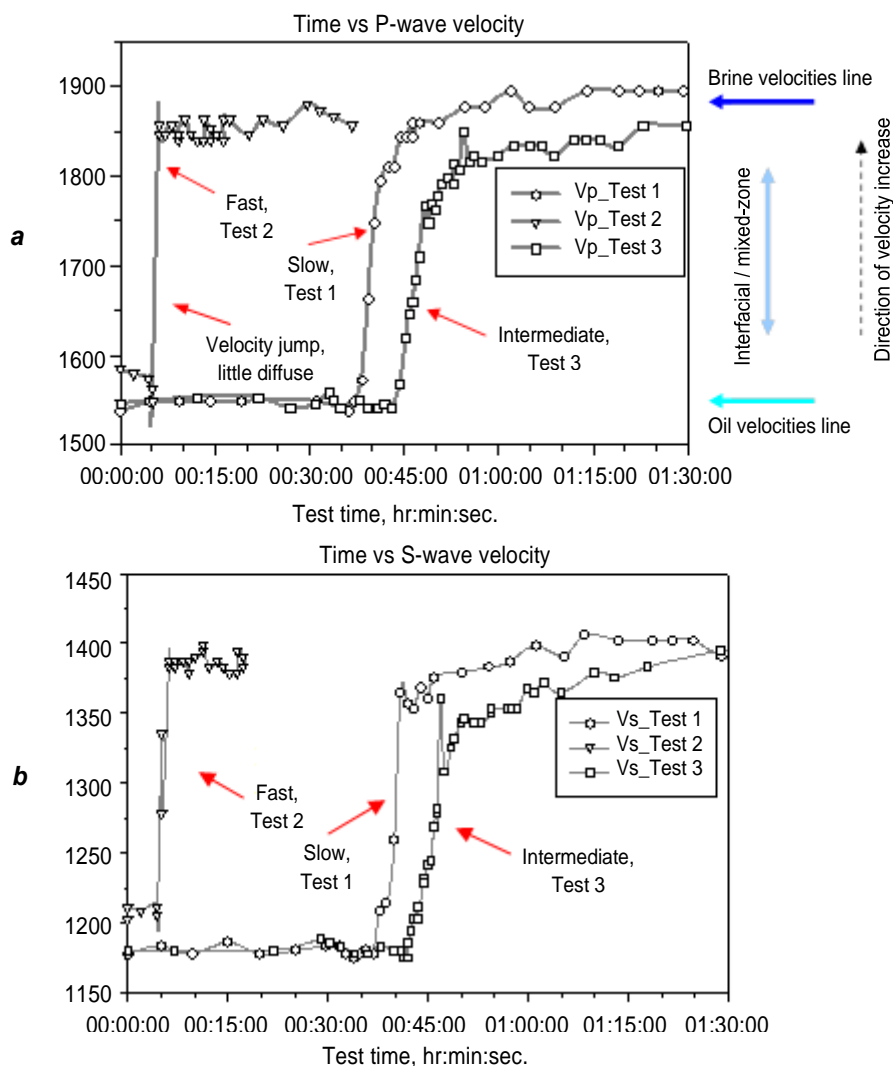


Fig. 11. P- and S-wave velocity variation for all tests:

a – P-wave velocity variation for all tests corresponding to occurrence of different possible phases;

b – S-wave velocity variation for all tests corresponding to same occurrences as depicted in (a)

Рис. 11. Изменение скорости P- и S-волн во всех опытах:

a – изменение скорости P-волны во всех опытах, соответствующих наступлению различных возможных фаз;

b – изменение скорости S-волны во всех опытах, соответствующих тем же явлениям, что и в (a)

information of Fig. 12, *b* fills the gap, understandable from further discussion. The artifact of amplitude loss points to or allows deducing the interface being a typical energy release defect with the meanings of axis of phenomenological thermo-mechanical conversion comparable to minimization of entropy, where mathematical implications for further understanding are available in [41]. The excessive energy loss possibly may include such contributions as more physical aspects and causes of immiscibility in nature, such as slip and, squeeze and collision associated with “fluid bodies” of miniscule dimensions whether integrating with or disintegrating from the interface. This is in addition to other controls or effects of density and viscosity differences of fluids and

solid at the interface given also offering purely kinetic implications of surface tension as discussed. Further details for such parametric or factor effects could be understood from [42, 43]. Given, further, the nature of background matrix it could be deduced and understood that interplay of such psychical occurrences in the flow process with their evolution would cause and also be effected by elastic wave diffraction and interference as of concepts described in initial discussion i. e., granular packing mechanistic aspects, contributing to wave damping and amplitude loss. It also could be argued and inferred that viscous effects may have a more pronounced visible or sensible effect or control of wave damping and energy dissipation compared to that of density in the



observed and examined parametric data. Differences in the magnitude of the stable level amplitudes corresponding to pure immiscible fractions or saturations as shown in Fig. 12 since is not as large in comparison to the difference in the corresponding velocity magnitudes shown in Fig. 11, for the difference in the magnitudes of the density and viscosity of the oil and brine phases and the characteristic sensitivity of elastic wave propagation. Further the amplitude artifacts of mixed-zone are better resolved against the background compared to that of corresponding velocity variations or related artifacts.

In Fig. 12, *b*, S-wave amplitude variations for Test 2 (extreme left, curve of points shown in inverted triangles) show a very short duration of the

existence of the interfacial layer, with the amplitudes corresponding to pure phases / saturations being much lower in magnitude compared to those of Test 1 and Test 3, or to the same information of Fig. 12, *a*. It also, does however depict an amplitude increase followed by a loss of same subtly confirming existence of an interface though not prominent, obscure in Fig. 12, *a*, as indicated. A decrease, similarly, in the duration of occurrence of mixed-zone coincidental with, and corresponding to, amplitude loss is also observable. These artifacts defining the existence of mixed-zone in a narrow space-time window indicate a local flow rate increase in addition to confirming a higher global fluid mobility. Interestingly also, and further, such fluid flow effects, though more subtle

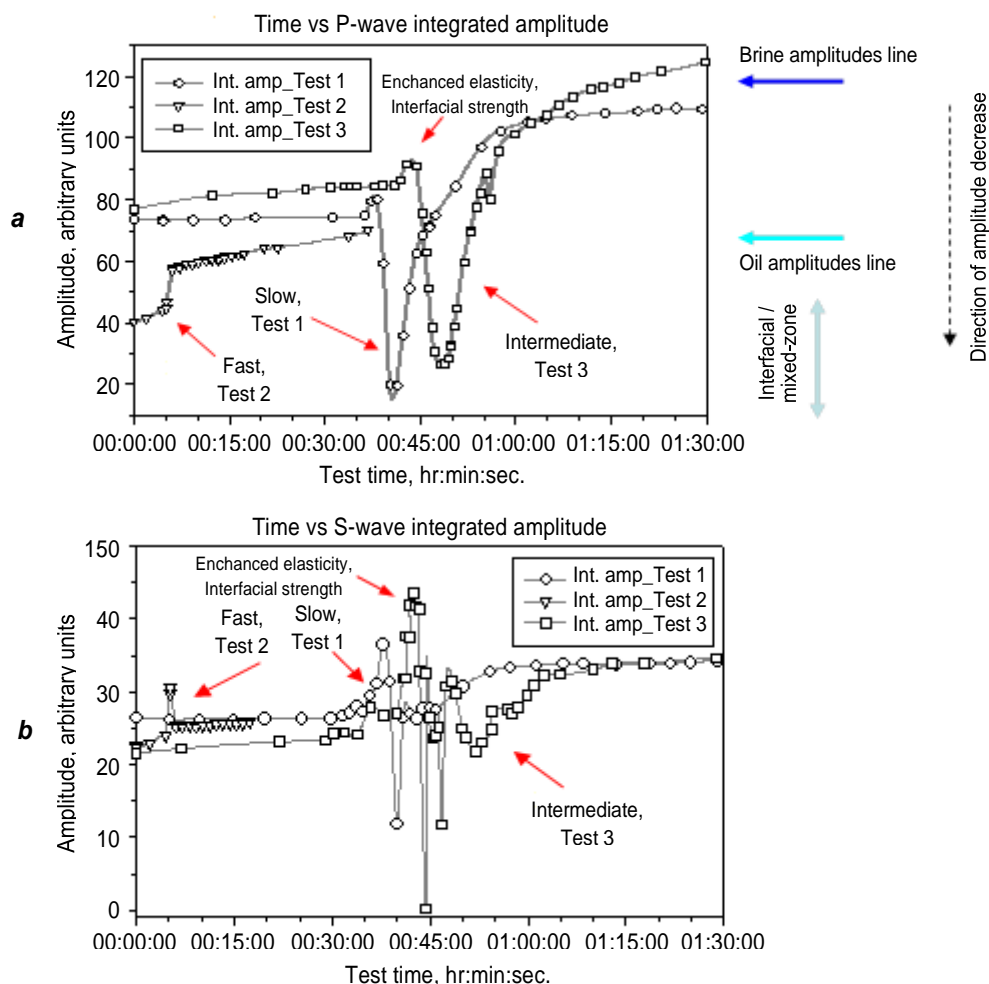


Fig. 12. P- and S-wave integrated amplitudes variation for all tests:

a – P-wave integrated amplitudes variation for all tests corresponding to occurrence of different possible phases and identified features of interest;

b – S-wave integrated amplitudes variation for all tests corresponding to same occurrences as in (*a*)

Рис. 12. Изменение интегральных амплитуд P- и S-волн для опытов:

a – изменение интегральных амплитуд P- волны для всех опытов, соответствующих возникновению различных возможных фаз, а также соответствующих выявленным изучаемым особенностям; *b* – изменение интегральных амплитуд S-волны для всех опытов, соответствующих тем же случаям, что и в (*a*)



could also be identified for the other two (processes) cases of Test 1 and Test 3. If, where in a converse sense, the existence of mixed-zone is well defined and spread in space-time, as amplitude effects it shall correspond to a slow local flow rate and also lower mobility but more “diffuse” mixed-zone or mixed phase.

These observations, in retrospect, can be correlated to information of Fig. 11. In this regard velocity variation, since in Fig. 11, *a*, corresponding to transition from oil phase saturation to brine saturation for Test 2 process is quite steep, as velocity for the mixed-zone almost approaches that of the brine in a short duration comparatively. S-waves velocity variation, depicted in Fig. 11, *b*, further generally corroborates the information and inferences of Fig. 11, *a* for corresponding curves of Test 1, Test 2 and Test 3. Additionally and more importantly S-wave information of Fig. 11, *b* also clarifies and resolves not only any ambiguities regarding existence of the interfacial zone, observable as Test 2 curve significant velocity jumps or variations and not visible in corresponding curve of Fig. 11, *a*, but also allows understanding of two important and useful characteristic aspects. Firstly that the added confidence of time-space localization of the interfacial zone may allow a reliable description of its morphology by an efficient collective inferring of data, and secondly that S-waves can prove very useful in providing better resolution in certain geometrical topologies and situations, possibly for differences in frequency content, for comparable P-wave velocity where further discussion is beyond the scope of document.

Given the discussion immediately above and with reminiscence of the constituents of system at hand, it is deducible from collective data examination that the narrower the duration in amplitudes spread, steeper the slope of velocity in gradient. The duration, further or time of observed existence of mixed phase saturation is marked by consistently and significantly damped P-wave amplitudes in magnitude compared to those of pure phases or saturants, and S-waves amplitudes that fluctuate between amplitudes both higher and lower than those of single phase amplitudes. This is clearly observable at the (elapsed) test time instances of 50 min, 1 hour and 5 min after the onset of the flow of the invading fraction /

brine in all three tests, respectively. This exactly correlates with the time of the dim spots identified in Fig. 10. In addition to manifesting significant sensitivity in velocity (strength type) measurements, the collective amplitude examination, importantly, also confirms greater sensitivity of the S-wave amplitudes while transmitted through heterogeneous medium i. e., mixed phase saturation, which is due to S-wave inherently characteristic polarized and mode altered propagation.

Another important aspect, that of wave damping or amplitude loss due to contribution both of or as an indicator of (a) local and (b) mobility or say global flow rate effects could be discussed, noticed above. A combined assessment of P- and S-wave velocity and amplitude graphical results, confirm that an increase of flow rate during the fluid displacement type process can cause an early break through by such mechanisms comparable to an onset of plumes or fingers of the brine phase or saturation, such as the identified mixed phase or interfacial zone. Due to deformation and evolution of the interface, plumes formed would advance ahead of the stable interfacial front, a presumed monolayer in the case at hand, possibly due also to viscous fingering effects. This is deducible from examining Test 2, in detail as there is little indication of a smooth or more diffuse transition zone in comparison to consideration of corresponding and similar, artifacts and effects respectively, in Test 1 and Test 3 where an existence of well defined transitioning zone could be inferred.

In summary, and wider perspective, the examination of ultrasonic data or measurements, and that of time domain, velocities and amplitudes magnitude records for the case at hand assumes not only laboratory scale investigations significance it also enhances understanding of field scale applications, implications. Foremost, the laboratory scale simulation of immiscible-displacement set an example for modeling similar porous media flow associated processes, as state-of-the art method. Such simulations are significantly useful in designing, developing and constraining computer simulations, by multiple analyses post experiment other than immediate visualization. The anticipated components or embodiments not only of the process of interest i. e., immiscible displacement for example were vividly



observable as well explicable outcomes much to success but also offered further insights; especially the observation of interfacial region occurrence and evolution with implications of fluid-fluid and fluid-solid interactions. Such complex surface tension related effects, as observed, with direct implications on immiscible-displacement efficiency are also reported elsewhere. The surface tension, for example, control as of [44, 45] has been emphasized to regulate wettability and effect efficiency of immiscible displacements, and interfacial tension was found or predicted to be sole factor to cause low recovery. In their experimental modeling [46] have arrived at similar conclusions from a geo-environmental remediation perspective (i. e., NAPLs and LNAPLs), observing that efficiency of such “flooding and displacements” processes depends upon factor of “wetting and nonwetting” and comparable issues affecting the interfacial region significantly. In their stochastic models [47] speculate and investigate contribution of the gravity difference (density) based buoyancy effects upon the immiscible interface or boundary / front stability. They propose that immiscible interfacial spreading by deformation or evolution and stability could both be affected by gravity difference and (material and otherwise overall) heterogeneity depending upon length scale.

In field scale sense, and regardless of objective, it thus is well clarified that in immiscible displacement and comparable processes, an early break through may occur when the invading fluid is injected at a much increased flow rate (a higher mobility) and it starts flowing downstream well before displacement of the invaded phase is completed, confirming fluid flow rate control and dependence, and requirement of an optimal flow rate, in implementation of such a process. It, further is also deducible that in case for example of contaminants or pollutants subsurface transport or flows, with possibly varying degrees of ground water or otherwise dissolution in sediments, physical composition and morphology of the flows could be complex in occurrence and fate; meaning that multiple flows constituents could independently and separately co-occur, as if in an inert equilibrated state with well defined interfaces or fluid fronts and boundaries without any (physical or chemical) evolving interaction within

or with surrounding environment, while at other instances there could be certain distinguishable degree of interactions and miscibility with diffusion into surrounding environment.

In geophysical inferring of near surface and / or near field, thus, one may confront or contend with the situation of dealing with the detected geophysical data or information beyond the expected regarding any anticipated targets due both, either to the “incomplete” understanding of the method or that of the possibilities of the process of interest, and so integration of data and / or methods could provide the much needed resolution.

Adequacy of observations and analytical verification

Assumption of adequate resolution in terms of the probed length scales in size range from a single bead or grain, few beads, compared further with the propagation length, holds for plausible interpretation. Maximum wave propagation length of about 5cm with transducer diameter “d” being 13 mm and a grain or bead size of 0.5 mm, suffice for meeting the criterion of adequate resolution attainment [48], i. e., $d = 4 \lambda$, with input amplitude dynamic control, considering the packed core system as sediment aggregate, to remind. Reliability of methodology and adequacy of the resultant outcomes is established by comparative assessment with works of [49, 50] and others relevant, cited by them. Analytical verification is implemented by using functional description or models of Gassman and Biot theory comparable to a numerical approach i. e., high and low frequency closure. The expressions in compact form are briefly described by following equations, and are eventually used for P-wave velocities estimates. Various input quantities for a fluid substitution type analysis for each saturation type, are described in Table 1 with appropriate units, in appendix. The relation of phenomenological density terms ρ_{ij} of Biot theory to those of granular pack properties as described in the equations, are well known, and derived and described in [51]. Usual analytical equations (1–6), to determine P-wave velocities using Gassman fluid substitution method are given below;

$$V_{P_{sat}} = \sqrt{\frac{K_{sat} + (4/3)G_{sat}}{P_{sat}}}, \quad (1)$$



$$K_{sat} = K_{solid} \left[\phi K_{dry} - \frac{(1+\phi) \frac{K_{fluid} K_{dry} + (4/3) G_{sat}}{K_{solid} + K_{fluid}}}{(1-\phi) K_{fluid} + \phi K_{solid} - \frac{K_{fluid} K_{dry}}{K_{solid}}} \right], \quad (2)$$

$$\rho = (1 - \phi) \rho_{solid} + \phi \rho_{fluid}, \quad (3)$$

$$G_{sat} = G_{dry}, \quad (4)$$

$$K_{dry} = \rho \{ (V_p^2) - 4/3 (V_s^2) \}, \quad (5)$$

$$G_{dry} = \rho (V_s^2). \quad (6)$$

The graphical illustration of Fig. 13 depicts or tends to advocate the adequacy of the inferred outcomes of the three experiments of the dynamic immiscible displacement study. It is clearly observable that the two solutions naturally provide an upper and lower bound for the experimental measurements. All three experiments are represented by quasi static state descriptors given as Oil phase, Mixed phase and Brine phase. Oil phase point is a single minimum possible velocity chosen to identify existence of 100 % oil saturation. Brine phase point or points, in a similar sense correspond to a maximum velocity point perceived to represent 100 % brine saturation. These two points are not averages of various observations but two extreme readings to provide a sense of minima and maxima, statistically meaning that the values provide for strict bounds and any trends, considering corresponding observations of all experiments will only fall and clustered within described bounds. The Mixed phase points are calculated by applying a

usual fractional weighted averaging method to a spread of values, contrary to choosing a maxima and minima from the spread, to account for variability of fluid fractions in mixed phase saturation for an adequate both parametric sense and sensible positioning of the representative estimated value within the bounds. Thus for a certain spread of values of the dynamic process precise representative static values are generated.

The drained bulk and rigidity moduli (dry frame moduli) are estimated from the ultrasonically determined velocity measurements. In order to understand the response of the form of conventionally adjusted models of fluid substitution type analyses chosen i. e. Gassman and Biot, the adjusted and unadjusted values of these dynamic moduli were used for input. Adjustment of the frame bulk modulus is suggested at various instances regarding such analyses as emphasized by [52, 53] to account for or create real porous rock effects. Both the adjusted or unadjusted moduli along with the information of the other petrophysical (porosity, density etc.) properties are used in the analysis, after creating composite bulk moduli and densities of the saturated porous media. Gassman equations and Biot equations in simplified functional form, as presented, with estimates of adequate corresponding inputs are used to estimate P-wave velocity values of the saturated medium. Analyses are performed for all three saturants using the drained strength information or moduli. After several analyses and trails with adjusted and unadjusted frame bulk

Table 1. Properties of constituents of laboratory unconsolidated core analogue
Таблица 1. Свойства компонентов лабораторного неуплотненного аналога керна

Property	Value
Bead / grain dia.	0.5 mm
Bead / grain material density (ρ_s or ρ_{solid})	2.5–2.6 Sp.gr. approx.
Grain material bulk modulus	4.39 GPa
Porosity of granular pack (ϕ)	26 v/v %
Structure factor of porous granular pack (α)	2.4 dim. less
Adjusted / measured frame bulk modulus (K_b)	4 GPa
Measured frame shear modulus (N or G)	2.44 GPa
Mineral oil / displaced fluid density (ρ_f oil)	0.761 Sp.gr
Mineral oil bulk modulus (K_f oil)	1 GPa
Mineral oil viscosity	10 cP
Brine / displacing fluid density (ρ_f brine)	1.028 Sp. gr
Brine salinity	3.5 w/v %
Brine viscosity	1.3 cP
Brine bulk modulus (K_f brine)	2.45 GPa
Fluid mixed-zone bulk density estimate (ρ_f mixt.)	0.891 Sp.gr

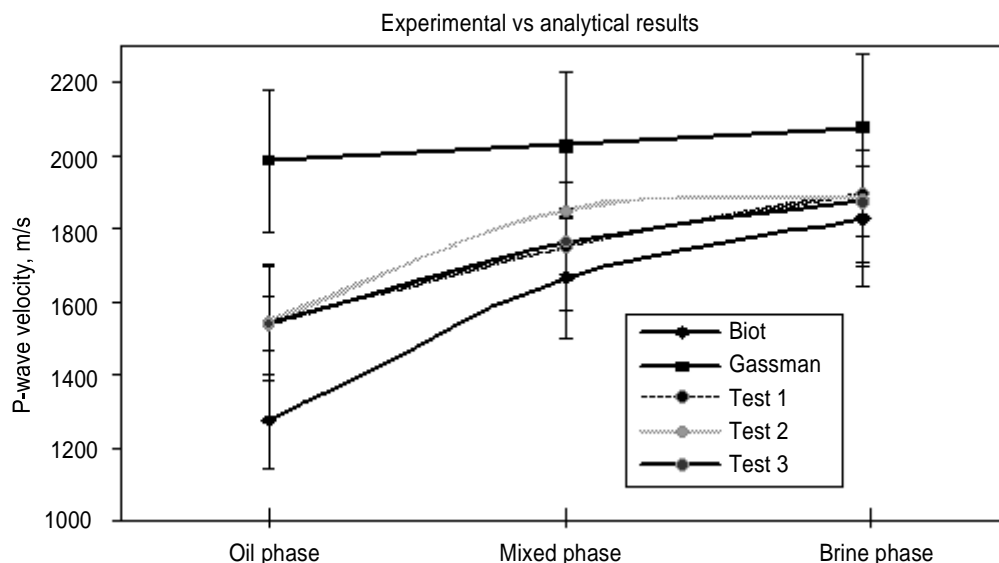


Fig. 13. Experimental P-wave values of the immiscible displacement experiments compared with the analytical results generated by usual models of wave propagation based on Gassman and Biot theories

Рис. 13. Экспериментальные значения P-волн в экспериментах по несмешивающемуся смещению по сравнению с аналитическими результатами обычных моделей распространения волн, основанных на теориях Гассмана и Био

moduli and any other associated parameters, certain important facts especially given anomalous behavior of granular porous media were understood. Provided further with an understanding that the analyses were not to test the limitations of the theory to examine a “data fit”, the analyses were rather done to examine the adequacy of the experimental outcomes in a predictive sense. In holding with an empirical nature or sense of inputs, the restriction of constancy of rigidity with complete disregard of saturation effects i. e., conventional $\mu_{sat} = \mu_{dry}$ of frame, was maintained, with the fact in hind sight that a zero frequency solution is sought from ultrasonic measurements. Further for guessing or estimating solid grain and frame bulk moduli in a suitable range, another restriction to be taken in consideration was that the ratio of K_{dry} / μ_{dry} (for dry or drained frame) should not be less than unity, if possible which is brought to attention with illustration and citation of several references regarding fluid substitution exercise by [54]. Resulting outcomes, after addressing the restrictions and the associated computational issues of the experimental and analytical nature corresponding to the analysis, are plotted a fixed points with error bars. The outcomes reasonably populate or fall within one standard deviation, as in Fig. 13.

The S-wave results are not plotted for inability of the models to provide stable solution marked

by significant underestimation. This might be affected by, a speculated, significantly strong bearing of viscosity on strength moduli for the un-cemented and un-sintered unconsolidated material evaluated. In such analyses, [55] has pointed out that fluid effects upon seismic (or acoustic) signatures in unconsolidated sediments are not only controlled by fluid bulk moduli but are influenced by viscosity effects too. In an indirect sense it is deducible that the effects of viscosity upon rigidity of a stiff porous frame are different from that of a granular frame. The significance of the reliability of verification draws upon two factors. Firstly that the dry matrix / frame shear and bulk moduli were ultrasonically measured by same procedure used in the displacement experiments, and adjusted for any residual saturation effects before other estimations. Secondly not only that analytical velocity values determined predicted the velocity values corresponding to pure saturations but also and interestingly the velocity estimates for mixed phase were statistically plausible.

Concluding remarks

Effectiveness of integrated methods by examining P- and S-wave chronographic including velocity data for reliable characterization of near surface contaminant flow processes, in unconsolidated sediments is demonstrated. Rationale of emphasis, further, is drawn upon the need for



understating physical and chemical dimensions or aspects of both the anthropogenic and natural stressors of near surface; with implications and challenges of subsurface geophysical inferring due to creation of complex surrounding or local geological system confining such flow processes. Some well fitting examples, in this regard, of possibilities and situations of stressors covering local to regional geological settings and factors from past and also present are cited and explained. A simplified connection towards describing and examining such effects is draw by evaluating an analogue situation of immiscible displacement process occurrence through a granular material packing stimulated by P- and S-waves, including effect also of re-packing and re-saturation.

P-wave ultrasonic velocities magnitudes, including the time-sections or records with other data patterns within, were unambiguously supported by corresponding S-wave data. Both P- and S-wave data correlated well and allowed unambiguously identify three separate regions or components of the monitored or imaged flow process of interest. These were high-density brine saturated zone, a low-density oil saturated zone and more importantly a medium-density mixed-zone in parametric sense; manifested as extremes of higher and lower velocities, separated by a spread of intermediate velocities respectively. Apart from velocities, P- and S-wave integrated amplitudes, both were observed much damped or lowest for interfacial zone but remained higher for brine saturated zone compared to those of oil saturated zone. There was satisfactory correlation in amplitudes data too. The fluctuation of S-wave amplitudes for the mixed or interfacial zone was however much pronounced, compared to that of P-wave, depicting a greater

S-wave sensitivity, unexpectedly. It clearly defined an energy dissipation marker, of an oil-water type interface, with a polarization affectation or dependence of transmitted ultrasonic energy. Further a noticeable characteristic spike in S-wave amplitudes fluctuation, for the same zone, not prominent in P-wave ones, indicates rigidity properties, meaning that the identified interfacial region is well bounded as a monolayer type feature manifesting or assuming a structural consistency with strength. In addition, both velocity and amplitude sensitivity of interfacial stability in evolution and degree of mixing, as a pluming or viscous fingering effect, with a direct dependence on flow rate, could also be deduced and / or assessed form examining the velocity variation slopes. These two aspects, vital finding, would have been difficult to infer from P-wave data only.

It is also interesting to infer that S-waves, for adequate bandwidth, can appropriately see where P-wave may be blinded such as variation of rigidity effects. S-waves interestingly also reveal a proportionately higher sensitivity to confined fluids at the scale of interest or observation discussed. Plausible analytical confirmation of the experimental results by usual models not only show their usefulness in assessing a dynamic process in terms of static points but also reveal that S-wave characteristics in the models are not appropriately accounted for. The results not only show possibility of attaining a greater resolution by integrated acoustic field surveys for flexibility of being able to exploit combination of different polarizations, bandwidths and energy levels suited to situation and purpose, but the use of such techniques for nano-scale process synthesis, control and characterization could be appreciated.

References

1. Cavazza W., Wezel F. C. The Mediterranean region-a geological primer. *Episodes*. 2003;26(3)160-168. <https://doi.org/10.18814/epiiugs/2003/v26i3/002>.
2. Doglioni C., Flores G. *An introduction to the Italian geology*. Potenza: Lamisco; 1997. 96 p.
3. Esposito E., Porfido S., Violante C., Biscarini C., Alaia F., Esposito G. Water events and historical flood recurrences in the Vietri sul Mare coastal area (Costiera Amalfitana, southern Italy). In: *The basis of civilization – water science?: proceedings of the UNESCO / IAHS / IWAHA symposium*. Rome; 2004, p. 95–106.
4. Violante C., Biscarini C., Esposito E., Molliso F., Porfido S., Sacchi M. The consequences of hydrological events on steep coastal watersheds, the Costa d'Amalfi, eastern Tyrrhenian Sea. In: *The role of hydrology in water resources management: proceedings of a symposium*. Capri; 2009, vol. 327, p. 102–113.
5. Dragoni W., Pellergrini M., Zvatti A. Some examples of ground water pollution in Italy. *Studies in Environmental Science*. 1981;17:101-104. [https://doi.org/10.1016/S0166-1116\(08\)71889-2](https://doi.org/10.1016/S0166-1116(08)71889-2).



6. Iadanza C., Trigila A., Vittori E., Serva L. Landslides in coastal areas of Italy. *Geological Society of London, Special Publications*. 2009;322(1):121-141. <https://doi.org/10.1144/SP322.5>.
7. Civita M. V., Massarutto A., Seminara G. Groundwater in Italy: a review. *Easac.eu*. Available from: https://easac.eu/fileadmin/PDF_s/reports_statements/Italy_Groundwater_country_report.pdf [Accessed 24th December 2021].
8. Newell C. J., Acree S. D., Ross R. R., Huling S. G. Light nonaqueous phase liquids. *Epa.gov*. <https://www.epa.gov/sites/default/files/2015-06/documents/lnapl.pdf> [Accessed 24th December 2021].
9. Lio Y., Sibson R. H., Takeshita T., Sagiya T., Shibazaki B., Nakajima T. J. Crustal dynamics: unified understanding of geodynamic processes at different time and length scales. *Earth, Planets and Space*. 2018;70:97. <https://doi.org/10.1186/s40623-018-0869-6>.
10. Müller B., Doan M.-L., Goebel T. H., Liu Y., Martínez-Garzón P., Mitchell T., et al. Understanding and anticipating induced seismicity. *Eos*. 2021;102. <https://doi.org/10.1029/2021EO161325>.
11. Cui H., Zhou J., Li Z., Gu C. Editorial: soil and sediment pollution, processes and remediation. *Frontiers in Environmental Science*. 2021;9:822355. <https://doi.org/10.3389/fenvs.2021.822355>.
12. Rosenqvist I. T. The influence of physico-chemical properties upon the mechanical properties of clays. *Clays and Clay Minerals*. 1960;9:12-27. <https://doi.org/10.1346/CCMN.1960.0090103>.
13. Steeples D. W. Near-surface geophysics: 75 years of progress. *The Leading Edge*. 2005;24(s1):s82-s85. <https://doi.org/10.1190/1.2112395>.
14. Noell U., Meyer U. Future chances and challenges for near surface geophysics. *American Geophysical Union, Fall Meeting*. 2011:NS11B-01.
15. Doll W. E., Miller R. D., Bradford J. The emergence and future of near-surface geophysics. *The Leading Edge*. 2012;31(6):684-692. <https://doi.org/10.1190/tle31060684.1>.
16. Butt S. D. Development of an apparatus to study the gas permeability and acoustic emission characteristics of outburst prone sandstone as a function of stress. *International Journal of Rock Mechanics and Mining Sciences*. 1999;36(8):1079-1085. [https://doi.org/10.1016/S1365-1609\(99\)00067-2](https://doi.org/10.1016/S1365-1609(99)00067-2).
17. Donald J. A., Butt S. D., Iakovlev S. Adaptation of a triaxial cell for ultrasonic P-wave attenuation, velocity and acoustic emission measurements. *International Journal of Rock Mechanics and Mining Sciences*. 2004;41(6):1001-1011. <https://doi.org/10.1016/j.ijrmms.2004.03.004>.
18. Van Meurs P. The use of transparent three dimensional models for studying mechanism of flow processes in oil reservoirs. *Petroleum Transactions, AIME*. 1957;210(1):295-301. <https://doi.org/10.2118/678-G>.
19. Chen J.-D., Wada N. A new technique for visualizing the distribution of oil, water and quartz grains in a transparent, three dimensional, porous medium. *SPE Formation Evaluation*. 1986;1(2):205-208. <https://doi.org/10.2118/13349-PA>.
20. Torquato S., Truskett T. M., Debenedetti P. G. Is random closed packing of spheres well defined? *Physical Review Letters*. 2000;84(10):2064-2067. <https://doi.org/10.1103/PhysRevLett.84.2064>.
21. Hertz H. R. On the contact of rigid elastic solids. *Journal für die Reine und angewandte Mathematik*. 1881;92:156-171. (In German).
22. Mindlin R. D. Compliance of elastic bodies in contact. *Journal of Applied Mechanics*. 1949;16:259-268. <https://doi.org/10.1115/1.4009973>.
23. Stoll R. D. *Sediment acoustics*. New York: Springer-Verlag; 1989. 153 p.
24. Digby P. J. The effective elastic moduli of porous granular rocks. *Journal of Applied Mechanics*. 1981;48(4):803-808. <https://doi.org/10.1115/1.3157738>.
25. Biot M. A. Mechanics of deformation and acoustic propagation in porous media. *Journal of Applied Physics*. 1962;33:1482-1498. <https://doi.org/10.1063/1.1728759>.
26. Dunlap H. F., Johnson C. H. Research and progress in exploration. *Geophysics*. 1958;23(2):267-284. <https://doi.org/10.1190/1.1438467>.
27. Duffy J., Mindlin R. D. Stress-strain relations and vibrations of a granular medium. *Journal of Applied Mechanics*. 1957;24(4):585-593. <https://doi.org/10.1115/1.4011605>.
28. Dereziewicz H. Stress-strain relations for a simple model of granular medium. *Journal of Applied Mechanics*. 1958;25(3):402-406. <https://doi.org/10.1115/1.4011835>.
29. Hales T. C. A proof of the Kepler conjecture. *Annals of Mathematics*. 2005;162:1065-1185. <https://doi.org/10.4007/annals.2005.162.1065>.
30. Rogers C. A. The packing of equal spheres. *Proceedings of the London Mathematical Society*. 1958;s3-8(4):609-620. <https://doi.org/10.1112/plms/s3-8.4.609>.
31. King W. C., Witten A. J., Reed G. R. Detection and imaging of buried wastes using seismic wave propagation. *Journal of Environmental Engineering*. 1989;115(3):527-540. [https://doi.org/10.1061/\(ASCE\)0733-9372\(1989\)115:3\(527\)](https://doi.org/10.1061/(ASCE)0733-9372(1989)115:3(527)).
32. Potts B. D., Santamarina C. Geotechnical tomography: the effects of diffraction. *Geotechnical Testing Journal*. 1993;16(4):510-517. <https://doi.org/10.1520/GTJ10290J>.
33. Berryman J. G. Scattering by a spherical inhomogeneity in a fluid-saturated porous medium. *Journal of Mathematical Physics*. 1985;26(6):1408-1419. <https://doi.org/10.1063/1.526955>.
34. Yamakawa N. Scattering and attenuation of elastic waves. *The Geophysical Magazine*. 1962;31:63-103.
35. Davies J. T., Rideal E. K. *Interfacial phenomenon*. New York: Academic Press; 1963. 480 p.
36. Newman J. L., Waddell C., Sauder H. L. A flowmeter for measuring subsurface flow rates. *Journal of Petroleum Technology*. 1956;8(7):49-52. <https://doi.org/10.2118/509-G>.
37. Curtis M. R. Flow analysis in producing wells. *Fall Meeting of the Society of Petroleum Engineers of AIME*. 1967. <https://doi.org/10.2118/1908-MS>.
38. Woessner W. W., Sullinvan K. E. Results of seepage meter and mini piezometer study. *Ground Water*. 1984;22:561-568.
39. England W. A., Mackenzie A. S., Mann D. M., Quigley T. M. The movement and entrapment of petroleum fluids in the subsurface. *Journal of the Geological Society*. 1987;144(2):327-347. <https://doi.org/10.1144/gsjgs.144.2.0327>.



40. Becker M. W., Georgian T., Ambrose H., Siniscalchi J., Fredrick K. Estimating flow and flux of ground water discharge using water temperature and velocity. *Journal of Hydrology*. 2004;296(1-4):221-233. <https://doi.org/10.1016/j.jhydrol.2004.03.025>.
41. Ziomek L. J. Wave propagation in the rectangular coordinate system. In: *Fundamentals of acoustic field theory and space-time signal processing*. Boca Raton: CRC Press; 1995, p. 47–151.
42. Vinogradova O. I. Slippage of water over hydrophobic surfaces. *International Journal of Mineral Processing*. 1999;56(1-4):31-60. [https://doi.org/10.1016/S0301-7516\(98\)00041-6](https://doi.org/10.1016/S0301-7516(98)00041-6).
43. Markov M. G. Effect of interfacial slip on the kinematic and dynamic parameters of elastic waves in a fluid-saturated porous medium. *Acoustical Physics*. 2007;53:213-216. <https://doi.org/10.1134/S1063771007020157>.
44. Mungan N. Role of wettability and interfacial tension in water flooding. *Society of Petroleum Engineers Journal*. 1964;4(2):115-123. <https://doi.org/10.2118/705-PA>.
45. Mungan N. Interfacial effects in immiscible liquid-liquid displacement in porous media. *Society of Petroleum Engineers Journal*. 1966;6(3):247-253. <https://doi.org/10.2118/1442-PA>.
46. Rimmer A., Parlange J. Y., Steenhuis T. S., Darnault C., Wendy C. Wetting and nonwetting fluid displacements in porous media. *Transport in Porous Media*. 1996;25:205-215. <https://doi.org/10.1007/BF00135856>.
47. Bolster D., Neuwiler I., Dentz M., Carrera J. The impact of buoyancy on front spreading in heterogeneous porous media in two-phase immiscible flow. *Water Resources Research*. 2011;46(2):W02508. <https://doi.org/10.1029/2010WR009399>.
48. Carino N. J. Stress wave propagation methods. In: Malhotra V. M., Carino N. J. (eds.). *Handbook of nondestructive testing of concrete*. Boca Raton: CRC Press; 2004, p. 275–304.
49. Stoll R. D. Acoustic waves in ocean sediments. *Geophysics*. 1977;42(2):715-725. <https://doi.org/10.1190/1.1440741>.
50. Plona T. J., Johnson D. L. Experimental study of the two bulk compressional modes in water-saturated porous structures. 1980 *Ultrasonic Symposium*. 1980:866-672. <https://doi.org/10.1109/ULTSYM.1980.197522>.
51. Plona T. J., D'Angelo R., Johnson D. L. Velocity and attenuation of fast, shear and slow waves in porous media. *IEEE Symposium on Ultrasonics*. 1990;36:1233-1239. <https://doi.org/10.1109/ULTSYM.1990.171559>.
52. Mavko G., Mukerji T., Dvorkin J. *The rock physics handbook: tools for seismic analysis in porous media*. New York: Cambridge University Press; 2007. 329 p.
53. Rasolofosaon P. J., Zinszner B. E. Poroelastic equations closely examined by ultrasonic experiments in rocks. In: *Poromechanics IV: Proceedings of the Fourth Biot Conference on Poromechanics*. New York: Destech Publications; 2009, p. 661–666.
54. Smith T. M., Sondergeld C. H., Rai C. S. Gassmann fluid substitutions: a tutorial. *Geophysics*. 2003;68(2):430-440. <https://doi.org/10.1190/1.1567211>.
55. Berryman J. G. Fluid effects on seismic waves in hard rocks with fractures and soft granular media. *Poromechanics IV: Proceedings of the Fourth Biot Conference on Poromechanics*. New York: Destech Publications; 2009, p. 598–603.

Список источников

1. Cavazza W., Wezel F. C. The Mediterranean region-a geological primer // *Episodes*. 2003. Vol. 26. Iss. 3. P. 160–168. <https://doi.org/10.18814/epiugs/2003/v26i3/002>.
2. Doglioni C., Flores G. An introduction to the Italian geology. Potenza: Lamisco, 1997. 96 p.
3. Esposito E., Porfido S., Violante C., Biscarini C., Alaia F., Esposito G. Water events and historical flood recurrences in the Vietri sul Mare coastal area (Costiera Amalfitana, southern Italy) // *The basis of civilization – water science?: proceedings of the UNESCO / IAHS / IWSA Symposium*. Rome, 2004. P. 95–106.
4. Violante C., Biscarini C., Esposito E., Molliso F., Porfido S., Sacchi M. The consequences of hydrological events on steep coastal watersheds, the Costa d'Amalfi, eastern Tyrrhenian Sea // *The role of hydrology in water resources management: proceedings of a symposium*. Vol. 327. Capri, 2009. P. 102–113.
5. Dragoni W., Pellergrini M., Zvatti A. Some examples of ground water pollution in Italy // *Studies in Environmental Science*. 1981. Vol. 17. P. 101–104. [https://doi.org/10.1016/S0166-1116\(08\)71889-2](https://doi.org/10.1016/S0166-1116(08)71889-2).
6. Iadanza C., Trigila A., Vittori E., Serva L. Landslides in coastal areas of Italy // *Geological Society of London, Special Publications*. 2009. Vol. 322. Iss. 1. P. 121–141. <https://doi.org/10.1144/SP322.5>.
7. Civita M. V., Massarutto A., Seminara G. Groundwater in Italy: a review // *Easac.eu*. Available from: https://easac.eu/fileadmin/PDF_s/reports_statements/Italy_Groundwater_country_report.pdf [Accessed 24th December 2021].
8. Newell C. J., Acree S. D., Ross R. R., Huling S. G. Light nonaqueous phase liquids // *Epa.gov*. <https://www.epa.gov/sites/default/files/2015-06/documents/lnapl.pdf> [Accessed 24th December 2021].
9. Lio Y., Sibson R. H., Takeshita T., Sagiya T., Shibazaki B., Nakajima T. J. Crustal dynamics: unified understanding of geodynamic processes at different time and length scales // *Earth, Planets and Space*. 2018. Vol. 70. P. 97. <https://doi.org/10.1186/s40623-018-0869-6>.
10. Müller B., Doan M.-L., Goebel T. H., Liu Y., Martínez-Garzón P., Mitchell T., et al. Understanding and anticipating induced seismicity // *Eos*. 2021. Vol. 102. <https://doi.org/10.1029/2021EO161325>.
11. Cui H., Zhou J., Li Z., Gu C. Editorial: soil and sediment pollution, processes and remediation // *Frontiers in Environmental Science*. 2021. Vol. 9. P. 822355. <https://doi.org/10.3389/fenvs.2021.822355>.
12. Rosenqvist I. T. The influence of physico-chemical properties upon the mechanical properties of clays // *Clays and Clay Minerals*. 1960. Vol. 9. P. 12–27. <https://doi.org/10.1346/CCMN.1960.0090103>.



13. Steeples D. W. Near-surface geophysics: 75 years of progress // *The Leading Edge*. 2005. Vol. 24(s1). P. s82–s85. <https://doi.org/10.1190/1.2112395>.
14. Noell U., Meyer U. Future chances and challenges for near surface geophysics // *American Geophysical Union, Fall Meeting*. 2011. P. NS11B-01.
15. Doll W. E., Miller R. D., Bradford J. The emergence and future of near-surface geophysics // *The Leading Edge*. 2012. Vol. 31. Iss. 6. P. 684–692. <https://doi.org/10.1190/tle31060684.1>.
16. Butt S. D. Development of an apparatus to study the gas permeability and acoustic emission characteristics of out-burst prone sandstone as a function of stress // *International Journal of Rock Mechanics and Mining Sciences*. 1999. Vol. 36. Iss. 8. P. 1079–1085. [https://doi.org/10.1016/S1365-1609\(99\)00067-2](https://doi.org/10.1016/S1365-1609(99)00067-2).
17. Donald J. A., Butt S. D., Iakovlev S. Adaptation of a triaxial cell for ultrasonic P-wave attenuation, velocity and acoustic emission measurements // *International Journal of Rock Mechanics and Mining Sciences*. 2004. Vol. 41. Iss. 6. P. 1001–1011. <https://doi.org/10.1016/j.ijrmms.2004.03.004>.
18. Van Meurs P. The use of transparent three dimensional models for studying mechanism of flow processes in oil reservoirs // *Petroleum Transactions, AIME*. 1957. Vol. 210. Iss. 1. P. 295–301. <https://doi.org/10.2118/678-G>.
19. Chen J.-D., Wada N. A new technique for visualizing the distribution of oil, water and quartz grains in a transparent, three dimensional, porous medium // *SPE Formation Evaluation*. 1986. Vol. 1. Iss. 2. P. 205–208. <https://doi.org/10.2118/13349-PA>.
20. Torquato S., Truskett T. M., Debenedetti P. G. Is random closed packing of spheres well defined? // *Physical Review Letters*. 2000. Vol. 84. Iss. 10. P. 2064–2067. <https://doi.org/10.1103/PhysRevLett.84.2064>.
21. Hertz H. R. Über die Berührung fester elastischer Körper // *Journal für die Reine und angewandte Mathematik*. 1881. Vol. 92. S. 156–171.
22. Mindlin R. D. Compliance of elastic bodies in contact // *Journal of Applied Mechanics*. 1949. Vol. 16. P. 259–268. <https://doi.org/10.1115/1.4009973>.
23. Stoll R. D. *Sediment acoustics*. New York: Springer-Verlag, 1989. 153 p.
24. Digby P. J. The effective elastic moduli of porous granular rocks // *Journal of Applied Mechanics*. 1981. Vol. 48. Iss. 4. P. 803–808. <https://doi.org/10.1115/1.3157738>.
25. Biot M. A. Mechanics of deformation and acoustic propagation in porous media // *Journal of Applied Physics*. 1962. Vol. 33. P. 1482–1498. <https://doi.org/10.1063/1.1728759>.
26. Dunlap H. F., Johnson C. H. Research and progress in exploration // *Geophysics*. 1958. Vol. 23. Iss. 2. P. 267–284. <https://doi.org/10.1190/1.1438467>.
27. Duffy J., Mindlin R. D. Stress-strain relations and vibrations of a granular medium // *Journal of Applied Mechanics*. 1957. Vol. 24. Iss. 4. P. 585–593. <https://doi.org/10.1115/1.4011605>.
28. Dereziewicz H. Stress-strain relations for a simple model of granular medium // *Journal of Applied Mechanics*. 1958. Vol. 25. Iss. 3. P. 402–406. <https://doi.org/10.1115/1.4011835>.
29. Hales T. C. A proof of the Kepler conjecture // *Annals of Mathematics*. 2005. Vol. 162. P. 1065–1185. <https://doi.org/10.4007/annals.2005.162.1065>.
30. Rogers C. A. The packing of equal spheres // *Proceedings of the London Mathematical Society*. 1958. Vol. s3-8. Iss. 4. P. 609–620. <https://doi.org/10.1112/plms/s3-8.4.609>.
31. King W. C., Witten A. J., Reed G. R. Detection and imaging of buried wastes using seismic wave propagation // *Journal of Environmental Engineering*. 1989. Vol. 115. Iss. 3. P. 527–540. [https://doi.org/10.1061/\(ASCE\)0733-9372\(1989\)115:3\(527\)](https://doi.org/10.1061/(ASCE)0733-9372(1989)115:3(527)).
32. Potts B. D., Santamarina C. Geotechnical tomography: the effects of diffraction // *Geotechnical Testing Journal*. 1993. Vol. 16. Iss. 4. P. 510–517. <https://doi.org/10.1520/GTJ10290J>.
33. Berryman J. G. Scattering by a spherical inhomogeneity in a fluid-saturated porous medium // *Journal of Mathematical Physics*. 1985. Vol. 26. Iss. 6. P. 1408–1419. <https://doi.org/10.1063/1.526955>.
34. Yamakawa N. Scattering and attenuation of elastic waves // *The Geophysical Magazine*. 1962. Vol. 31. P. 63–103.
35. Davies J. T., Rideal E. K. *Interfacial phenomenon*. New York: Academic Press, 1963. 480 p.
36. Newman J. L., Waddell C., Sauder H. L. A flowmeter for measuring subsurface flow rates // *Journal of Petroleum Technology*. 1956. Vol. 8, Iss. 7. P. 49–52. <https://doi.org/10.2118/509-G>.
37. Curtis M. R. Flow analysis in producing wells // *Fall Meeting of the Society of Petroleum Engineers of AIME*. 1967. <https://doi.org/10.2118/1908-MS>.
38. Woessner W. W., Sullinvan K. E. Results of seepage meter and mini piezometer study // *Ground Water*. 1984. Vol. 22. P. 561–568.
39. England W. A., Mackenzie A. S., Mann D. M., Quigley T. M. The movement and entrapment of petroleum fluids in the subsurface // *Journal of the Geological Society*. 1987. Vol. 144. Iss. 2. P. 327–347. <https://doi.org/10.1144/gsjgs.144.2.0327>.
40. Becker M. W., Georgian T., Ambrose H., Siniscalchi J., Fredrick K. Estimating flow and flux of ground water discharge using water temperature and velocity // *Journal of Hydrology*. 2004. Vol. 296. Iss. 1–4. P. 221–233. <https://doi.org/10.1016/j.jhydrol.2004.03.025>.
41. Ziomek L. J. Wave propagation in the rectangular coordinate system // *Fundamentals of acoustic field theory and space-time signal processing*. Boca Raton: CRC Press, 1995. P. 47–151.
42. Vinogradova O. I. Slippage of water over hydrophobic surfaces // *International Journal of Mineral Processing*. 1999. Vol. 56. Iss. 1–4. P. 31–60. [https://doi.org/10.1016/S0301-7516\(98\)00041-6](https://doi.org/10.1016/S0301-7516(98)00041-6).
43. Markov M. G. Effect of interfacial slip on the kinematic and dynamic parameters of elastic waves in a fluid-saturated porous medium // *Acoustical Physics*. 2007. Vol. 53. P. 213–216. <https://doi.org/10.1134/S1063771007020157>.
44. Mungan N. Role of wettability and interfacial tension in water flooding // *Society of Petroleum Engineers Journal*. 1964. Vol. 4. Iss. 2. P. 115–123. <https://doi.org/10.2118/705-PA>.



45. Mungan N. Interfacial effects in immiscible liquid-liquid displacement in porous media // Society of Petroleum Engineers Journal. 1966. Vol. 6. Iss. 3. P. 247–253. <https://doi.org/10.2118/1442-PA>.
46. Rimmer A., Parlange J. Y., Steenhuis T. S., Darnault C., Wendy C. Wetting and nonwetting fluid displacements in porous media // Transport in Porous Media. 1996. Vol. 25. P. 205–215. <https://doi.org/10.1007/BF00135856>.
47. Bolster D., Neuwiler I., Dentz M. Carrera J. The impact of buoyancy on front spreading in heterogeneous porous media in two-phase immiscible flow // Water Resources Research. 2011. Vol. 46. Iss. 2. P. W02508. <https://doi.org/10.1029/2010WR009399>.
48. Carino N. J. Stress wave propagation methods // Handbook of nondestructive testing of concrete / V. M. Malhotra, N. J. Carino. Boca Raton: CRC Press, 2004. P. 275–304.
49. Stoll R. D. Acoustic waves in ocean sediments // Geophysics. 1977. Vol. 42. Iss. 2. P. 715–725. <https://doi.org/10.1190/1.1440741>.
50. Plona T. J., Johnson D. L. Experimental study of the two bulk compressional modes in water-saturated porous structures // 1980 Ultrasonic Symposium. 1980. P. 866–672. <https://doi.org/10.1109/ULTSYM.1980.197522>.
51. Plona T. J., D'Angelo R., Johnson D. L. Velocity and attenuation of fast, shear and slow waves in porous media // IEEE Symposium on Ultrasonics. 1990. Vol. 36. P. 1233–1239. <https://doi.org/1109/ULTSYM.1990.171559>.
52. Mavko G., Mukerji T., Dvorkin J. The rock physics handbook: tools for seismic analysis in porous media. New York: Cambridge University Press, 2007. 329 p.
53. Rasolofosaon P. J., Zinszner B. E. Poroelastic equations closely examined by ultrasonic experiments in rocks // Poromechanics IV: Proceedings of the Fourth Biot Conference on Poromechanics. New York: Destech Publications, 2009. P. 661–666.
54. Smith T. M., Sondergeld C. H., Rai C. S. Gassmann fluid substitutions, a tutorial // Geophysics. 2003. Vol. 68. Iss. 2. P. 430–440. <https://doi.org/10.1190/1.1567211>.
55. Berryman J. G. Fluid effects on seismic waves in hard rocks with fractures and soft granular media // Poromechanics IV: Proceedings of the Fourth Biot Conference on Poromechanics. New York: Destech Publications, 2009. P. 598–603.

Information about the author / Информация об авторе



Bilal Hassan,
PhD,
Researcher Earth Science and Engineering,
Memorial University of Newfoundland,
St. John's, Canada,
p94bh@mun.ca,
<https://orcid.org/0000-0002-9373-8922>,
<http://scholar.google.ca/citations?hl=en&user=ubkN1-cAAAAJ>.
Хассан Билал,
доктор наук,
исследователь в области наук о Земле и технических наук,
Мемориальный университет Ньюфаундленда,
г. Сент-Джонс, Канада,
p94bh@mun.ca,
<https://orcid.org/0000-0002-9373-8922>,
<http://scholar.google.ca/citations?hl=en&user=ubkN1-cAAAAJ>.

Contribution of the author / Вклад автора

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

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

Conflict of interests / Конфликт интересов

The author declares no conflicts of interests.

Автор заявляет об отсутствии конфликта интересов.

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

Автор прочитал и одобрил окончательный вариант рукописи.

Information about the article / Информация о статье

The article was submitted 17.12.2021; approved after reviewing 21.01.2022; accepted for publication 25.02.2022.

Статья поступила в редакцию 17.12.2021; одобрена после рецензирования 21.01.2022; принята к публикации 25.02.2022.



Научная статья

УДК 553.463

<https://doi.org/10.21285/2686-9993-2022-45-1-34-49>

Минералогия и условия формирования руд Холтосонского вольфрамового месторождения

Людмила Борисовна Дамдинова^a, Татьяна Ивановна Сажина^b, Булат Батуевич Дамдинов^c^{a-c}Геологический институт СО РАН, г. Улан-Удэ, РоссияАвтор, ответственный за переписку: Сажина Татьяна Ивановна, Skuratova.tatyana@list.ru

Резюме. Целью представленного исследования являлось выявление и изучение особенностей минерального состава и условий формирования руд Холтосонского вольфрамового месторождения, расположенного в пределах Джидинского молибден-вольфрамового рудного поля (Юго-Западное Забайкалье, Россия). В ходе исследования авторами был использован комплекс минералогического-петрографического и термобарогеохимических методов. Молибденовое оруденение Джидинского рудного поля приурочено к апикальной части Первомайского штока (Первомайское месторождение), вольфрамовое – к многочисленным кварцевым жилам западной части рудного поля (Холтосонское жильное месторождение) и к штокеру в центральной части (Инкурское штокерное месторождение). Холтосонское месторождение занимает западную часть рудного поля и сложено многочисленными кварцевыми жилами, локализованными преимущественно в диоритах Модонкульского массива. В результате проведенных работ было установлено, что главный жильный минерал представлен кварцем, также присутствуют мусковит, калиевый полевой шпат и карбонаты. Главным рудным минералом Холтосонского месторождения является гюбнерит. В общей сложности было диагностировано более 20 минеральных видов, включающих сульфиды (пирит, халькопирит, галенит, сфалерит, борнит и другие), сульфосоли (тетраэдрит, айкинит, станнин и другие), оксиды (шеелит, касситерит), теллуриды (гессит). По данным изучения флюидных включений в солевом составе преобладают хлориды кальция с примесью хлоридов натрия и калия. Минимальные температуры отложения кварца варьируют в интервале ~195–344 °С. Большинство определений ложится в интервал ~250–300 °С. Наличие сингенетических существенно водных и существенно газовых включений в кварце из руд Холтосонского месторождения позволяет оценить интервал температур захвата флюидных включений в 413–350 °С. Результаты проведенных авторами исследований свидетельствуют о том, что главными факторами осаждения гюбнерита из гидротермальных растворов являются изменение щелочности-кислотности и снижение температуры.

Ключевые слова: Холтосонское месторождение, вольфрам, минеральный состав, флюидные включения, рудообразующие растворы, условия образования

Финансирование: Исследования выполнены при поддержке Министерства науки и высшего образования Российской Федерации (проект Геологического института СО РАН № АААА-А21-121011390003-9) и гранта Российского фонда фундаментальных исследований № 18-45-030002р_а.

Для цитирования: Дамдинова Л. Б., Сажина Т. И., Дамдинов Б. Б. Минералогия и условия формирования руд Холтосонского вольфрамового месторождения // Науки о Земле и недропользование. 2022. Т. 45. № 1. С. 34–49. <https://doi.org/10.21285/2686-9993-2022-45-1-34-49>.

Original article

Mineralogy and formation conditions of Kholtoson tungsten deposit ores

Lyudmila B. Damdinova^a, Tatyana I. Sazhina^b, Bulat B. Damdinov^c,^{a-c}Geological Institute, Siberian Branch of the Russian Academy of Sciences, Ulan-Ude, RussiaCorresponding author: Tatyana I. Sazhina, Skuratova.tatyana@list.ru

Abstract. The purpose of the research is to identify and study the features of mineral composition and formation conditions of ores of the Kholtoson tungsten deposit located within the Dzhida molybdenum-tungsten ore field (South-West Transbaikalia, Russia). The study employs a complex of mineralogical-petrographic and thermobarogeochemical methods. The molybdenum mineralization of the Dzhida ore field is confined to the apical part of the Pervomaysky stock (Pervomayskoye deposit), the tungsten mineralization is confined to numerous quartz veins in the western part of the ore field (Kholtoson vein deposit) as well as to the stockwork in the central part (Inkur stockwork deposit). The Kholtoson deposit occupies the



western part of the ore field and is composed of numerous quartz veins localized mainly in the diorites of the Modonkul massif. Conducted works allowed to find out that the main gangue mineral is quartz; muscovite, potassium feldspar and carbonates are also present. Hubnerite is the main ore mineral of the Kholtoson deposit. In total, more than 20 mineral species have been identified including sulfides (pyrite, chalcopyrite, galena, sphalerite, bornite, etc.), sulfosalts (tetrahedrite, aikinite, stannite, etc.), oxides (scheelite, cassiterite), tellurides (hessite). According to the data of fluid inclusions study, calcium chlorides with an admixture of sodium and potassium chlorides predominate in the salt composition of ore-forming fluids. The minimum temperatures of quartz deposition vary in the range of ~195–344 °C. Most of the homogenization temperatures determinations correspond to the range of ~250–300 °C. The presence of cogenetic fluid- and vapor-dominated inclusions in quartz from the ores of the Kholtoson deposit allows to estimate the fluid inclusion capture temperature range of 413–350 °C. The results of the studies carried out by the authors indicate that the main factors of hubnerite precipitation from hydrothermal solutions are changes in alkali-acid content and a temperature drop.

Keywords: Kholtoson deposit, tungsten, mineral composition, fluid inclusions, ore-forming solutions, formation conditions

Funding: The research was supported by the Ministry of Science and Higher Education of the Russian Federation (project of the Geological Institute SB RAS no. AAAAAA-A21-121011390003-9) and the grant of the Russian Foundation for Basic Research no. 18-45-030002r_a.

For citation: Damdinova L. B., Sazhina T. I., Damdinov B. B. Mineralogy and formation conditions of Kholtoson tungsten deposit ores. *Nauki o Zemle i nedropol'zovanie = Earth sciences and subsoil use*. 2022;45(1):34-49. (In Russ.). <https://doi.org/10.21285/2686-9993-2022-45-1-34-49>.

Введение

Джидинское рудное поле представляет собой пример крупного комплексного молибден-вольфрамового оруденения с высокой концентрацией полезных элементов на сравнительно небольшой площади. Здесь расположены три крупных месторождения, которые являются крупнейшими в регионе и в стране источниками вольфрама и молибдена: это месторождения Первомайское молибденовое и Инкурское и Холтосонское вольфрамовые. Помимо вольфрама и молибдена на месторождениях также отмечаются примеси других полезных ископаемых: бериллия, кадмия, свинца, цинка, золота и так далее. Предшественниками установлено, что все три месторождения Джидинского рудного поля генетически связаны с единой гранитоидной интрузией. Считается, что сначала сформировался молибденовый штокверк (Первомайское месторождение), позже – прожилки с молибден-бериллиевой минерализацией, затем – штокверк гюбнеритсодержащих прожилков (Инкурское месторождение), а завершали процесс рудообразования кварц-гюбнеритовые жилы Холтосонского месторождения.

Ранее нами было проведено изучение Первомайского молибденового месторождения, считающегося самым ранним в ряду объектов Джидинского рудного поля [1], и Инкурского штокверкового вольфрамового месторождения [2]. Также был уточнен изотопный возраст молибденового оруденения и определены концентрации металлов в рудообразую-

щих растворах. Однако современная информация о минеральном составе и условиях формирования жильного вольфрамового оруденения Джидинского рудного поля практически отсутствует в мировой литературе. В особенности это касается газо-солевого состава гидротермальных флюидов, параметров давления и температурных параметров рудоотложения, а также металлоносности растворов, продуцирующих жильно-штокверковое вольфрамовое оруденение. Минералогия вольфрамовых руд была изучена предшественниками во второй половине XX века, но в связи с отсутствием на тот момент прецизионных методов микроанализа не все минеральные фазы были достоверно диагностированы. В целом для грейзеновых молибден-вольфрамовых (бериллиевых) месторождений физико-химические условия формирования до сих пор не исследовались достаточно детально для того, чтобы выявить различия физико-химических параметров рудообразующих флюидов, формирующих вольфрамовую и молибденовую минерализацию на молибден-вольфрамовых месторождениях.

Настоящее исследование посвящено изучению вольфрамового оруденения Джидинского рудного поля на примере Холтосонского жильного месторождения. Целью исследования является уточнение минерального состава руд, определение условий формирования и состава гидротермальных растворов, продуцирующих жильное вольфрамовое оруденение Джидинского рудного поля.



Материалы и методы исследования

Для решения минералогических и петрографических задач в ходе исследования авторами применялись методы оптической микроскопии с использованием поляризационного микроскопа Olympus BX-51 с цифровой фотокамерой MicroPublisher 3.3 RTV. Химический состав минералов определен Е. В. Ходыревой и кандидатом геолого-минералогических наук С. В. Канакиным в Геологическом институте СО РАН (г. Улан-Удэ) методом рентгено-спектрального микроанализа на сканирующем электронном микроскопе LEO-1430VP с энергодисперсионным спектрометром INCA Energy 350.

Флюидные включения в минералах исследовались методами термометрии, криометрии, волюмометрии и спектроскопии комбинационного рассеяния света (КР-спектроскопии). Для определения температур общей гомогенизации, температур эвтектики и плавления льда водных растворов, температур растворения дочерних фаз и гомогенизации сжиженных газов использовалась микротермокамера THMSG-600 фирмы Linkam с диапазоном измерений температур от -196 до +600 °С. Стандартная аппаратная ошибка измерений составляет $\pm 0,1$ в отрицательной и ± 5 °С в положительной области температур. Приблизительную оценку содержания солей во включениях находили по температуре плавления льда, используя двухкомпонентную водно-солевую систему (NaCl-H₂O) через эквивалент хлорида натрия [3]. Преобладающая соль в водном растворе включений определялась по температуре эвтектики, характеризующей водно-солевую систему [4].

Состав газовой фазы индивидуальных флюидных включений был определен методом КР-спектроскопии в Институте геологии и минералогии имени В. С. Соболева СО РАН (г. Новосибирск) на одноканальном КР-спектрометре LabRamHR 800 с полупроводниковым детектором Horiba Scientific Symphony II и конфокальным микроскопом Olympus BX-41. В качестве возбуждающего использовано излучение аргонового лазера CVI Melles Girot с длиной волны 514 нм и выходной мощностью 30–50 мВт.

Результаты исследования

Краткая характеристика Джидинского рудного поля. Джидинское рудное поле расположено в юго-восточной части Западного Забайкалья, в пределах одноименной зоны палеозоид. Геология этого района изучалась многими исследователями и описана в работах Е. П. Малиновского [5], Д. О. Онтоева [6], Е. Е. Батуриной, Г. С. Риппа [7], И. В. Гордиенко и др. [8], А. Н. Дистановой [9], П. Ю. Ходановича, О. К. Смирновой [10], П. Ю. Ходановича и др. [11], И. В. Чернышева и др. [12], Ф. Г. Рейфа, Е. Д. Бажеева [13], Ф. Г. Рейфа [14], К. З. Стельмачонка [15, 16] и так далее.

Как уже отмечалось выше, в состав Джидинского рудного поля входят три крупных месторождения: Первомайское молибденовое, Инкурское штокверковое и Холтосонское жильное вольфрамовые. В геологическом строении рудного поля принимают участие хохюртовская осадочно-эффузивная свита, Модонкульский диоритовый массив и многофазная Гуджирская гранитоидная интрузия. Регион представляет собой сложнопостроенную покровно-складчатую область, геологическая структура которой определяется дислокациями позднепалеозойского этапа со значительной сдвиговой составляющей.

Через центральную часть рудного поля проходит Джидинский глубинный разлом, имеющий субмеридиональное простирание. Он трассируется зонами меланжа и бластомилонитизации общей мощностью 600–1000 м, содержащими небольшие линзовидные крутопадающие тела измененных гипербазитов цакирского комплекса. Хохюртовская свита занимает восточную часть данного рудного поля и сложена песчаниками, сланцами, известняками, а также вулканитами основного и среднего состава. Модонкульский интрузив является фрагментом крупного массива, вытянутого в северо-западном направлении, и сложен преимущественно кварцевыми диоритами [10].

В пределах контакта палеозойских кварцевых диоритов Модонкульского массива с эффузивно-осадочными толщами внедрилась Гуджирская интрузия, с которой связывается образование молибден-вольфрамового оруденения. Интрузия представлена на поверх-



ности многочисленными дайками кислого состава и Первомайским штоком гранит-порфиров (рис. 1). Среди пород дайкового комплекса выделяются также дайки серых сиенитов, серых кварцевых сиенит-порфиров, керсантитов, бостонитов и гранит-порфиров.

Первомайский шток гранит-порфиров является самым крупным выходом Гуджирской интрузии на поверхность. Площадь выхода Первомайского массива на дневную поверхность составляет 0,35 км². По данным буровых и геофизических работ, Первомайский массив представляет собой лакколитообразное тело с многочисленными апофизами, которое вытянуто в северо-западном направлении и погружается на юго-восток согласно кровле Модонкульского массива. В апикальной его части отмечаются ксенолиты гранитов и граносиенитов, а также ксенолиты пород

кровли, свидетельствующие о небольшой глубине эрозионного среза массива.

В апикальной части Первомайского гранитного массива локализовано одноименное молибденовое месторождение. Вольфрамовое оруденение представлено многочисленными кварцевыми жилами в западной части рудного поля (Холтосонское месторождение) и к штокверку в центральной части (Инкурский штокверк) (см. рис. 1). Последние изотопно-геохронологические данные о возрасте цирконов (124 ± 2 млн лет) из гранит-порфиров Первомайского штока, мусковита ($127,6 \pm 1,5$ млн лет) и молибденита ($118,5 \pm 1,6$ и $122,4 \pm 1$ млн лет) из рудных зон Первомайского молибденового месторождения свидетельствуют о генетической связи процессов гранитообразования и молибденового рудоотложения на рубеже 119–128 млн лет назад [1].

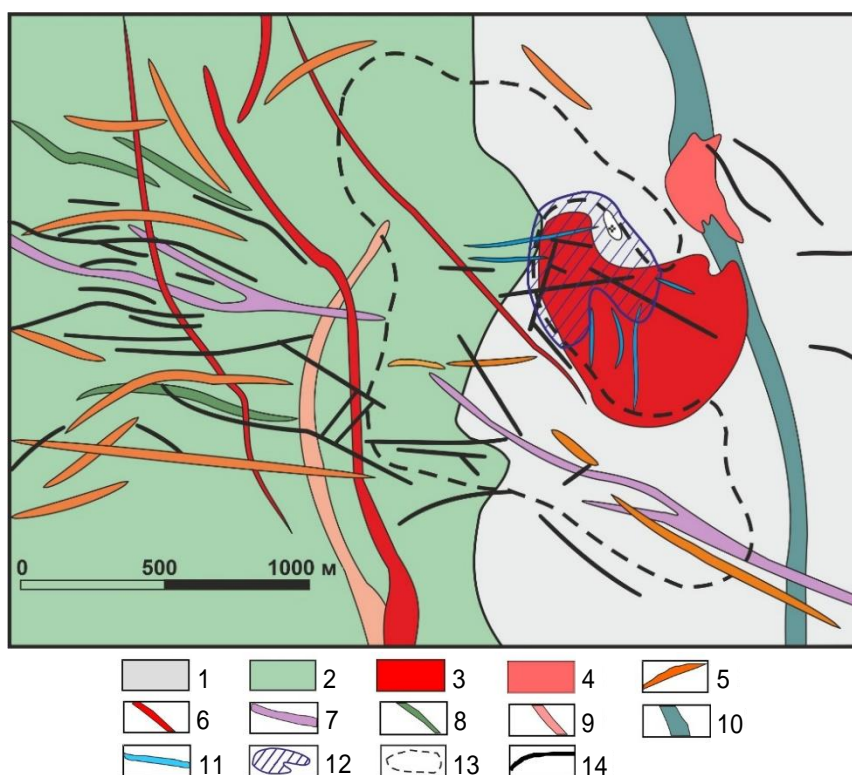


Рис. 1. Схематическая геологическая карта Джидинского рудного поля (по В. И. Игнатовичу, 1975):

1 – хохюртовская свита: метаморфизованные осадочные породы, эффузивы; 2 – Модонкульский массив: диориты, кварцевые диориты; 3 – Первомайский массив: гранит-порфиры; 4 – Горкинский массив: граниты; 5 – серые сиениты; 6 – дайки гранит-порфиров; 7 – дайки бостонитов; 8 – микродиориты; 9 – плагиограниты; 10 – Джидинский глубинный разлом; 11 – кварц-молибденитовые жилы; 12 – Первомайский молибденовый штокверк; 13 – Инкурский вольфрамовый штокверк; 14 – кварц-сульфидно-гюбнеритовые жилы

Fig. 1. Schematic geological map of the Dzhida ore field (according to V. I. Ignatovich, 1975):

1 – Khokhyurta suite: metamorphosed sediment rocks, effusives; 2 – Modonkul massif: diorites, quartz diorites; 3 – Pervomaisky massif: granite-porphyrates; 4 – Gorkinsky massif: granites; 5 – gray syenites; 6 – dykes of granite porphyry; 7 – dykes of bostonites; 8 – microdiorites; 9 – plagiogranites; 10 – Dzhida deep fault; 11 – quartz-molybdenite veins; 12 – Pervomaisky molybdenum stockwork; 13 – Inkur tungsten stockwork; 14 – quartz-sulfide-hubnerite veins



Геологическое строение Холтосонского месторождения. Холтосонское месторождение расположено к западу от Инкурского штока в значительном удалении от Первомайского гранитного массива (см. рис. 1), в пределах контактовой части Модонкульского интрузива кварцевых диоритов. Модонкульский интрузив рассекается дайками гранит-граносиенитового состава верхнепалеозойского дабанского комплекса (рис. 2, а).

Месторождение разведано на глубину 700–1000 м от поверхности. Всего известно более 200 кварц-сульфидно-гюбнеритовых жил (рис. 3). Жилы залегают преимущественно в диоритах Модонкульского массива и имеют пологое падение на юг и юго-запад. Размеры промышленных жил по простиранию и падению колеблются в широких пределах при мощности от десятых долей до 3–4 м, в

раздувах – до 15 м при средней мощности ~0,7–0,9 м (см. рис. 3). Около 80 жил разведаны и характеризуются промышленными параметрами вольфрамового оруденения [10, 11]. Среднее содержание триоксида вольфрама составляет ~0,77 масс. %. Верхние горизонты основных промышленных жил в настоящее время отработаны.

Рудные тела Холтосонского месторождения представлены кварц-гюбнеритовыми жилами (рис. 2, b, d), а также участками, обогащенными другими рудными минералами (сульфидами и сульфосолями) (рис. 2, c).

Минеральный состав Холтосонского месторождения. Холтосонское месторождение представлено кварц-гюбнеритовыми жилами с сульфидной минерализацией. Минеральный состав Холтосонского месторождения практически идентичен минеральному составу руд

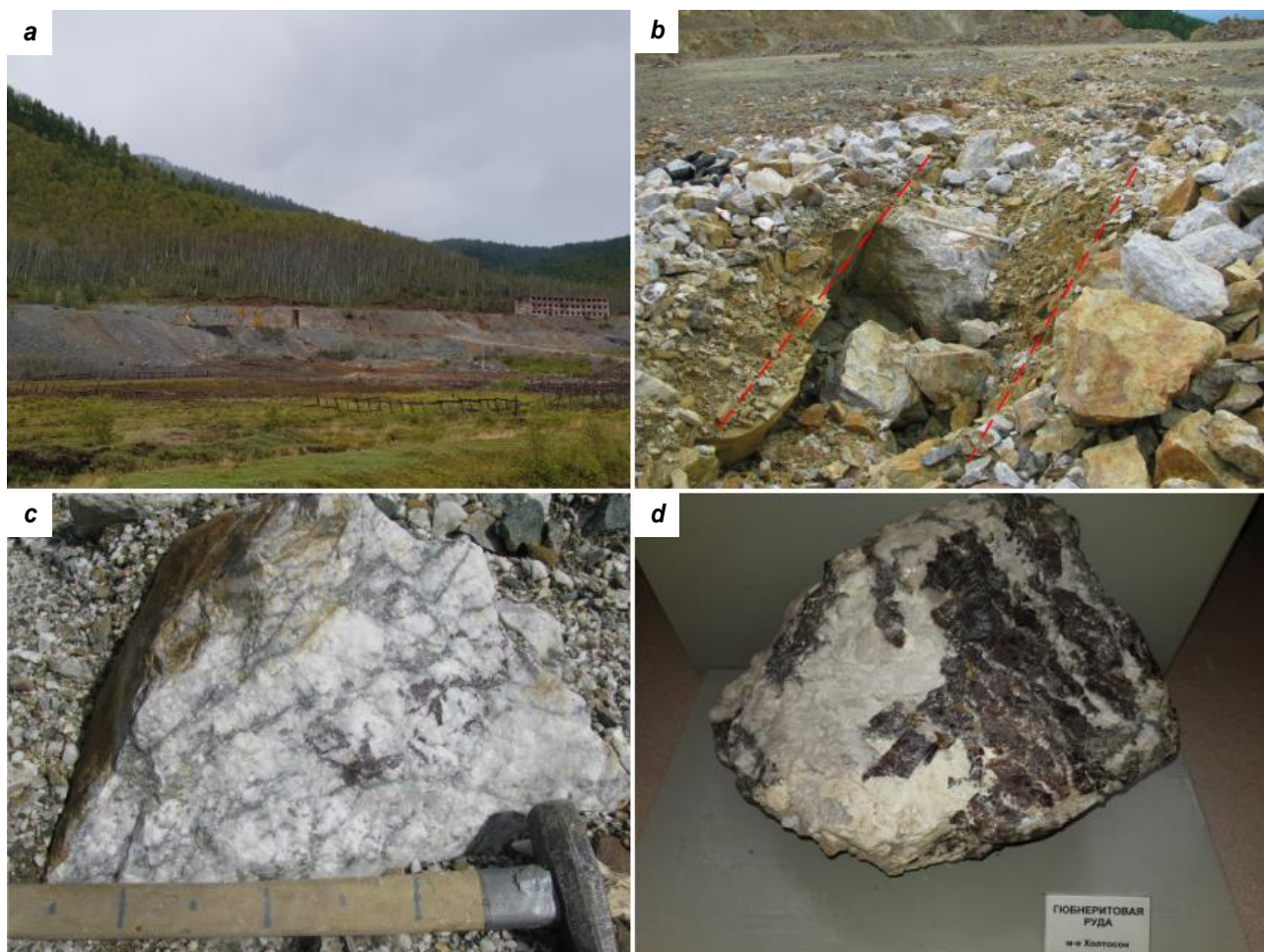


Рис. 2. Холтосонское месторождение:

а – карьер месторождения; б – кварц-гюбнеритовая жила (красный пунктир);
с – образец кварц-сульфидной жилы с гюбнеритом; d – богатая кварц-гюбнеритовая руда

Fig. 2. Kholtoson deposit:

a – deposit open-pit; b – quartz-hubnerite vein (red dotted line);
c – sample of quartz-sulphide vein with hubnerite; d – high-grade quartz-hubnerite ore

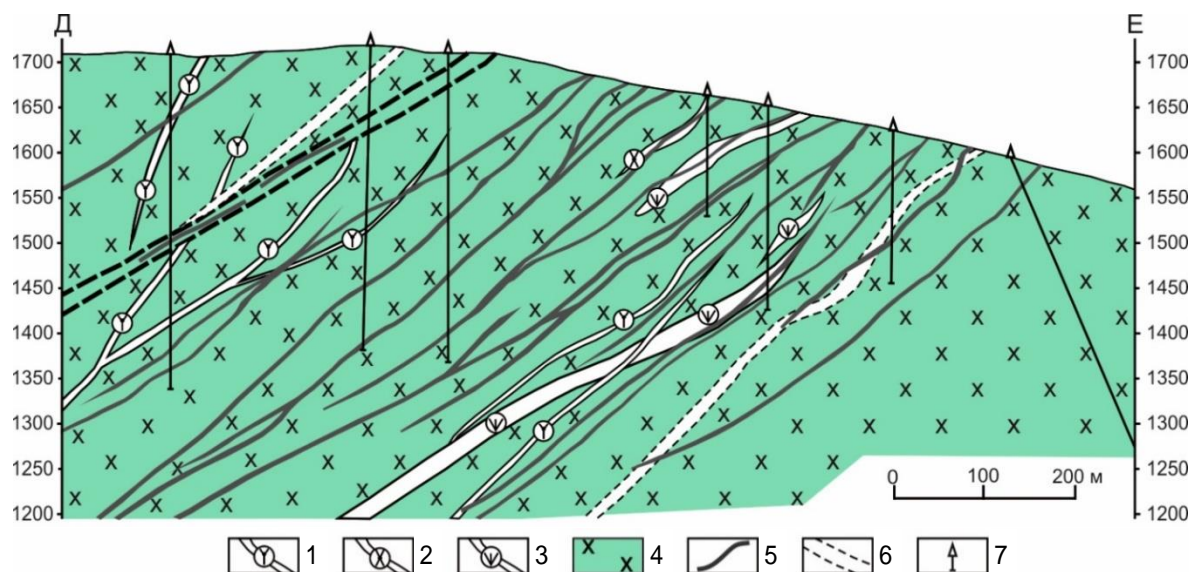


Рис. 3. Геологический разрез Холтосонского жильного вольфрамового месторождения по линии ДЕ (составлен с использованием материалов П. Ю. Ходановича (1995) и И. В. Гордиенко и др. (2019)):

1–3 – дайки: 1 – сиенитов и кварцевых сиенитов, 2 – сиенито-диоритов, 3 – бостонитов; 4 – диориты и кварцевые диориты джидинского комплекса; 5 – рудные жилы с вольфрамовым оруденением; 6 – зоны дробления по разрывным нарушениям; 7 – разведочные скважины

Fig. 3. Geological section of the Kholtoson vein tungsten deposit along the DE line (compiled using the materials of P. Y. Khodanovich (1995) and I. V. Gordienko et al. (2019)):

1–3 – dikes of: 1 – syenites and quartz syenites, 2 – syenites – diorites, 3 – bostonites; 4 – diorites and quartz diorites of the Dzhida complex; 5 – ore veins with tungsten mineralization; 6 – crushing areas by the faulting zone; 7 – exploration wells

Инкурского месторождения (табл. 1). Главный жильный минерал – кварц, в большом количестве присутствуют серицит, флюорит, из рудных минералов наблюдаются гюбнерит, пирит, халькопирит, галенит, сфалерит, шеелит и др. Жильные минералы преимущественно представлены молочно-белым кварцем, в меньшей степени – калиевым полевым шпатом, слюдами и редкими флюоритом и бериллом. В шлифах для зерен кварца характерно волнистое или мозаичное погасание. В некоторых участках отмечается интенсивная серицитизация по полевым шпатам или в виде тонких прожилков в зернах кварца. На контактах рудных жил с вмещающими породами нередко отмечаются грейзенизированные участки, сложенные практически сплошными агрегатами мусковита. Мусковит, как и в прожилках Инкурского месторождения, характеризуется повышенными содержаниями фтора (1,66–4,04 масс. %).

Участками в рудных кварцевых жилах встречаются карбонаты, представленные родохрозитом и сидеритом (см. табл. 1), которые обнаружены преимущественно в виде ксеноморфных агрегатов неправильной фор-

мы. Они часто приурочены к контактам зерен кварца или присутствуют в виде тонких поздних прожилков, заполняющих мелкие трещинки.

Кварц является «сквозным» минералом, то есть образуется на всех стадиях минералообразования от ранней к поздней. Скопления калиевого полевого шпата находятся в тесном сростании с кварцем, что говорит об их близодновременном образовании.

Кварц-гюбнеритовые жилы преимущественно сложены зернами светлого, светло-серого или молочно-белого кварца с единичными кристаллами гюбнерита или обогащенными участками с более крупными скоплениями или агрегатами гюбнерита. Такие участки содержат мелко- крупнокристаллические агрегаты гюбнерита в ассоциации с другими рудными минералами, среди которых преобладают пирит, галенит, сфалерит, тетраэдрит и второстепенные минералы.

Гюбнерит является главным рудным минералом месторождения, содержание марганца в нем достигает 17,86–19,34 масс. %. Большей частью он представлен вытянутыми шестоватыми кристаллами (см. рис. 2, d), реже



Таблица 1. Общий минеральный состав кварц-гюбнеритовых жил Холтосонского месторождения
Table 1. General mineral composition of quartz-hubnerite veins of the Kholtoson deposit

Холтосонское месторождение		
Жильные минералы	Главные	Кварц (SiO ₂)
	Второстепенные	Флюорит (CaF ₂)
		Калиевый полевой шпат (KAlSi ₃ O ₈)
		Мусковит (KAl ₂ [AlSi ₃ O ₁₀](OH) ₂)
Рудные минералы	Главные	Гюбнерит (MnWO ₄)
		Пирит (FeS ₂)
		Халькопирит (CuFeS ₂)
	Второстепенные	Сфалерит (ZnS)
		Галенит (PbS)
		Тетраэдрит (Cu ₃ SbS ₃)
		Айкинит (PbCuBiS ₃)
		Шеелит (CaWO ₄)
		Гессит (Ag ₂ Te)
		Станнин (Cu ₂ FeSnS ₄)
		Сидерит (FeCO ₃)
		Родохрозит (MnCO ₃)
		Редкие
	Борнит (Cu ₅ FeS ₄)	
	Матильдит (AgBiS ₂)	
	Неизвестные фазы (Cu ₂ PbS ₃ , Cu ₂ Pb ₃ S ₅)	
	Вторичные минералы	
Церрусит (PbCO ₃)		

агрегатами неправильной формы с характерной ярко-красной, коричневатой или бурой окраской. Выраженный идиоморфизм кристаллов гюбнерита и агрегаты неправильных зерен свидетельствуют о его отложении как на ранних, так и на более поздних этапах.

Кроме гюбнерита из вольфрамовых минералов в составе месторождения в меньших количествах присутствует шеелит (см. табл. 1). Он чаще слагает агрегаты неправильных форм и, по всей видимости, является более поздним по образованию минералом по сравнению с гюбнеритом.

Пирит нередко имеет наиболее идиоморфную форму, близкую к кубической (рис. 4, а), что говорит о его более раннем образовании. Нередко зерна пирита корродируются – как бы разъедаются другими рудными минералами, чаще галенитом. В некоторых образцах отмечаются сплошные скопления пирита.

Галенит в основном образует агрегаты неправильной формы с характерными треугольниками выкрашивания (рис. 4, а, б), чаще в сростании со сфалеритом, реже с халькопиритом и тетраэдритом. В некоторых участках он заполняет трещины в кристаллах гюбнерита. Галенит содержит примеси серебра до 2 масс. % и висмута до 4,6 масс. %.

Агрегаты сфалерита преимущественно неправильной формы (рис. 4, а, с) слагают тесные сростания с галенитом, что, по всей видимости, свидетельствует об их близодновременном формировании. В составе сфалеритов всегда отмечается примесь кадмия (от 0,48 до 1,34 масс. %), в некоторых зернах присутствует примесь железа (0,31–0,57 масс. %).

Халькопирит отмечается в виде агрегатов неправильной формы (см. рис. 4, с), а также нередко образует «оторочки» вокруг зерен пирита. Это говорит о том, что халькопирит является более поздним. В некоторых участках отмечается в виде мелких вкрапленников или сыпи в агрегатах сфалерита.

Тетраэдрит образует относительно идиоморфные кристаллы кубической или неправильной формы в тесном сростании с агрегатами халькопирита и галенита. Это свидетельствует об их близодновременном отложении в жилах либо о том, что тетраэдрит является несколько более ранним из-за более выраженного идиоморфизма. Кроме этого, он отмечается в виде микровключений каплевидной формы (рис. 4, д). Содержание мышьяка в тетраэдрите варьирует в пределах 4,68–5,95 масс. %, цинка – 6,83–7,41 масс. %.

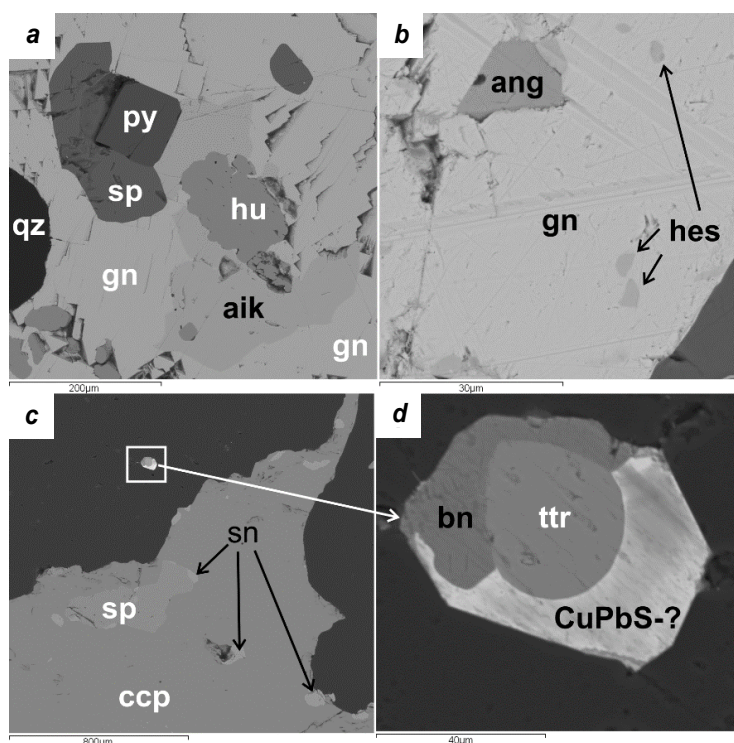


Рис. 4. Микрофотографии рудных минералов в обратно рассеянных электронах:

a – взаимоотношения гюбнерита, айкинита, сфалерита, пирита в агрегате галенита;
b – микровключения гессита (стрелки) в зерне галенита; *c* – сфалерит и станнин в агрегате халькопирита;
d – срастание борнита, тетраэдрита и неизвестной фазы CuPbS
hu – гюбнерит; *sp* – сфалерит; *py* – пирит; *gn* – галенит; *ccp* – халькопирит; *aik* – айкинит;
ttr – тетраэдрит; *qz* – кварц; *sn* – станнин; *hes* – гессит; *bn* – борнит; *ang* – англезит

Fig. 4. Micrographs of ore minerals in backscattered electrons:

a – relationships between hubnerite, aikinite, sphalerite, and pyrite in a galena aggregate;
b – hessite microinclusions (arrows) in a galena grain; *c* – sphalerite and stannite in a chalcopyrite aggregate;
d – intergrowth of bornite, tetrahedrite and an unknown CuPbS phase
hu – hubnerite; *sp* – sphalerite; *py* – pyrite; *gn* – galena; *ccp* – chalcopyrite; *aik* – aikinite;
ttr – tetrahedrite; *qz* – quartz; *sn* – stannite; *hes* – hessite; *bn* – bornite; *ang* – anglesite

Кроме вышеописанных минералов по результатам проведения электронной микроскопии в рудных жилах идентифицированы второстепенные и редкие минералы (см. табл. 1).

Айкинит присутствует в виде выделений неправильной формы в агрегатах галенита (см. рис. 4, а).

Станнин отмечается в виде мелких твердых включений в агрегатах халькопирита и сфалерита (см. рис. 4, с) и, кроме этого, в виде мелкой сыпи в зернах пирита. Особенностью химического состава станнина являются повышенные содержания цинка (4,5–12,4 масс. %) и меди (до 38,19 масс. %), а также пониженные содержания железа (до 10 масс. %) и олова (17,8–26,7 масс. %) по сравнению со стехиометрическим составом.

Борнит (см. рис 4, d) и гессит (см. рис 4, b) обнаружены в виде единичных зерен в кварце и микровключениях в галените.

Также в виде редких включений в галените отмечаются сульфовисмутит серебра и свинца шапбахит ($\text{Ag}_{0,4}\text{Pb}_{0,2}\text{Bi}_{0,4}\text{S}$) и сульфид висмута и серебра матильдит (AgBiS_2) в виде оторочек по галениту (см. табл. 1).

Кроме этого, в рудах идентифицированы неизвестные фазы с формулами, близкими к Cu_2PbS_3 и $\text{Cu}_2\text{Pb}_3\text{S}_5$ (см. рис. 4, d), образующие неоднородный агрегат в срастании с борнитом и тетраэдритом.

Вторичные гипергенные минералы представлены англезитом и церусситом, часто приуроченным к трещинкам и пустотам, что говорит об их позднем образовании.

На основе минералого-петрографического изучения авторами построена схематичная последовательность минералообразования в рудных жилах Холтосонского месторождения. Данная последовательность представлена на рис. 5.

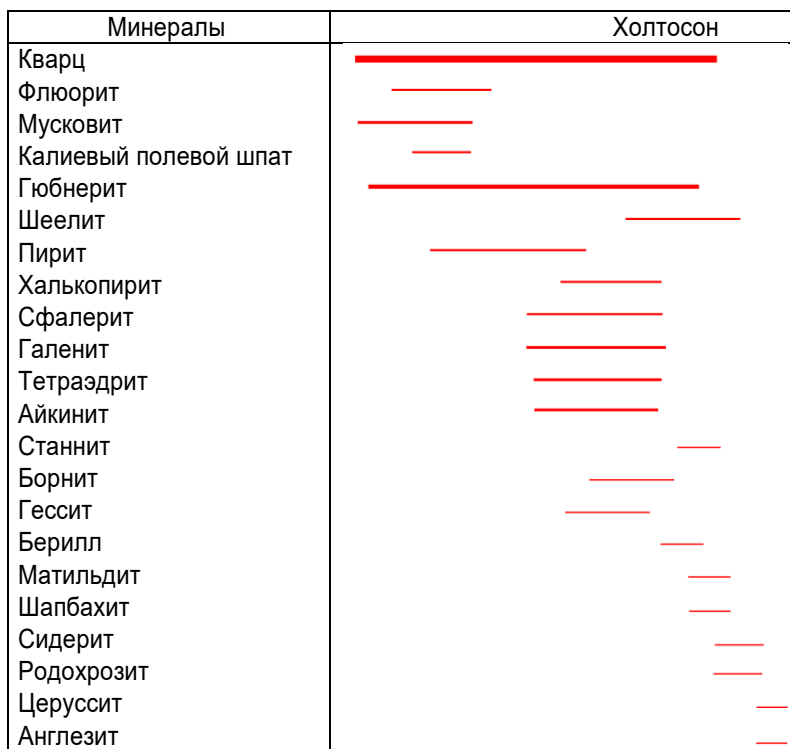


Рис. 5. Последовательность минералообразования в рудных жилах Холтосонского месторождения
Fig. 5. Sequence of mineral formation in the ore veins of the Kholtoson deposit

Термобарогеохимические исследования Холтосонского месторождения. Данные об условиях формирования и солевом составе рудообразующих растворов вольфрамового оруденения Холтосонского месторождения получены в результате изучения первичных флюидных включений из кварца, флюорита и гюбнерита кварц-сульфидно-гюбнеритовых жил. В этих минералах найдены включения с наиболее пригодными размерами для изучения методами термометрии, криометрии и КР-спектроскопии. В зернах кварца месторождения, как правило, доминируют вторичные включения, которые залечивают многочисленные трещины. К категории первичных флюидных включений, согласно известным критериям [17], отнесены флюидные включения, равномерно распределенные в объеме минерала-хозяина или приуроченные к зонам роста и располагающиеся на удалении от залеченных трещин и шлейфов вторичных включений.

В кварц-сульфидно-вольфрамитовых жилах Холтосонского месторождения главный жильный минерал также представлен кварцем. В нем первичные включения на удалении от залеченных трещин встречаются достаточно редко, они представлены одиночными

флюидными включениями или группами включений. Как правило, такие флюидные включения представлены двухфазовыми включениями (жидкость > газ) часто прямоугольной или ромбовидной формы размером в среднем от 10 до 20 мкм (рис. 6, а–с). Кроме этого, в зернах кварца обнаружены единичные флюидные включения (рис. 6, d) с достаточно крупной газовой фазой (жидкость = газ), природа таких включений недостаточно ясна. В зернах флюорита присутствуют также двухфазовые (жидкость > газ) редкие первичные включения (рис. 6, е–g), в некоторых из них отмечаются очень мелкие твердые фазы темного цвета (см. рис. 6, е), состав которых не удалось идентифицировать методом КР-спектроскопии. Эти включения в основном имеют округлую или изометричную форму, размеры их в среднем составляют 15–25 мкм. Подобные весьма редкие двухфазовые включения меньших размеров (≤ 10 мкм) обнаружены и в зернах гюбнерита (рис. 6, h).

Кроме этого, в некоторых зернах кварца отмечаются группы включений существенно водного и существенно газового состава (рис. 6, i, k, l), которые можно условно отнести к включениям гетерогенного захвата, поскольку они располагаются вблизи друг друга

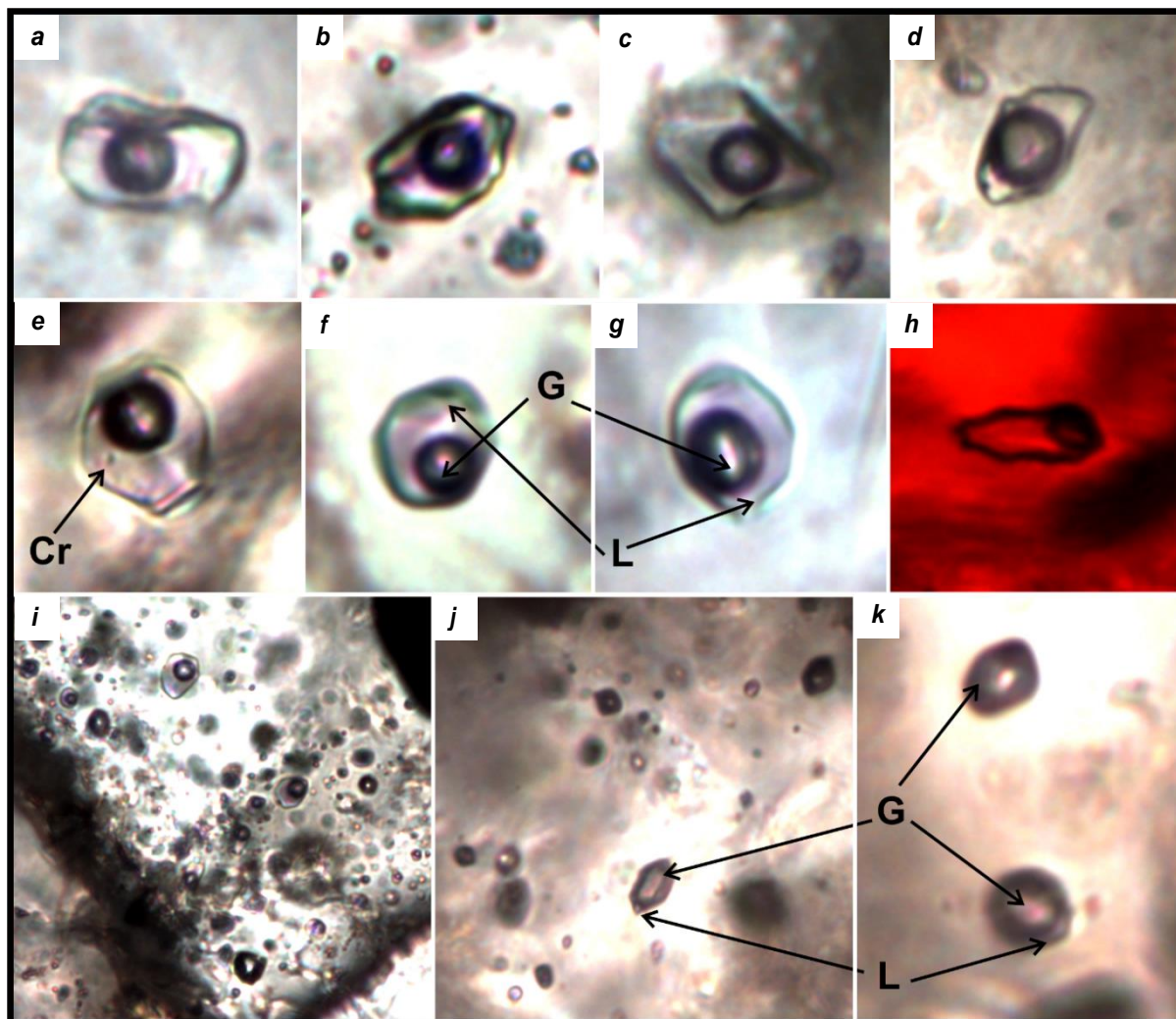


Рис. 6. Первичные флюидные включения из кварц-сульфидно-гюбнеритовых жил Холтосонского месторождения:

a–d – первичные двухфазовые флюидные включения гомогенного захвата в зернах кварца;
e – первичное флюидное включение с мелкой твердой фазой во флюорите; f, g – первичные двухфазовые флюидные включения в зернах флюорита; h – первичное двухфазовое включение в кристалле гюбнерита;
i – группа существенно газовых и существенно водных флюидных включений в зерне кварца;
j, k – сингенетичные флюидные включения в кварце

Длина масштабной линейки – 10 мкм

Fig. 6. Primary fluid inclusions from quartz-sulfide-hubnerite veins of the Kholtoson deposit:

a–d – primary two-phase fluid inclusions of homogeneous capture in quartz grains; e – primary fluid inclusions with a fine solid phase in fluorite; f, g – primary two-phase fluid inclusions in fluorite grains;
h – primary two-phase inclusion in a hubnerite crystal; i – group of vapor- and water-dominated fluid inclusions in a quartz grain; j, k – syngenetic fluid inclusions in quartz

The length of the scale rule is 10 μm

и поэтому, вероятнее всего, относятся к одной зоне роста минерала-хозяина. Размеры таких включений, как правило, небольшие – от первых микрометров до ~8–9 мкм. Наличие редких зерен с такими включениями, по всей видимости, является свидетельством эпизодического вскипания рудообразующих растворов.

Интервал температур гомогенизации изученных первичных включений гомогенного захвата в жильном кварце меняется от ≥ 344 до

210 °C (табл. 2, см. рис. 6). Температуры эвтектики в большинстве включений из кварца варьируют в интервале от ~-50 (в некоторых включениях -55) до -49 °C, реже в интервале от -38 до -36 °C. Данные температуры эвтектики свидетельствуют о присутствии в растворах таких солевых компонентов, как $\text{CaCl}_2\text{-KCl-H}_2\text{O}$, $\text{CaCl-H}_2\text{O}$, $\text{CaCl}_2\text{-NaCl-H}_2\text{O}$ и в меньшей степени $\text{MgCl-KCl-H}_2\text{O}$, $\text{NaCl-FeCl}_2\text{-H}_2\text{O}$, $\text{FeCl}_3\text{-H}_2\text{O}$.



Таблица 2. Сводная таблица результатов микротермометрических исследований флюидных включений в минералах Холтосонского месторождения
Table 2. Summary table of the results of microthermometric studies of fluid inclusions in Kholtoson deposit minerals

Минерал-хозяин	Тип флюидных включений		T_g , °C	$T_{пл\ льда}$, °C	$T_{эвт}$, °C	Соленость, масс. % экв. NaCl [3]	Тип солевой системы [4]
Кварц	Гомогенные		≥344...210	-7,2...-2,9	-38...-36 -50...-49 -55	4,8–10,7	MgCl-KCl-H ₂ O NaCl-FeCl ₂ -H ₂ O FeCl ₃ -H ₂ O CaCl ₂ -KCl-H ₂ O CaCl-H ₂ O CaCl ₂ -NaCl-H ₂ O
	Гетерогенные	Тип а – существенно газовые	≥413...350 (гомогенизация в газ)	–	–	–	–
		Тип б – существенно водные	≥400...370	~-4,4	-48...-47	~7	CaCl-H ₂ O
Флюорит	–	–	≥272...260	-3,9...-3,7	-49...-48	6–6,3	CaCl-H ₂
Гюбнерит	–	–	≥290...250	-6,5...-5,7	-55...-54	8,8–9,9	CaCl ₂ -NaCl-H ₂ O

Примечание. T_g – температура гомогенизации; $T_{пл\ льда}$ – температура плавления льда; $T_{эвт}$ – температура эвтектики; прочерк – параметр не определен.

Note. T_g – homogenization temperature; $T_{пл\ льда}$ – ice melting temperature; $T_{эвт}$ – eutectic temperature; dash – parameter is not defined.

Температуры гомогенизации существенно газовых флюидных включений (тип а) находятся в интервале ≥413–350 °C (см. рис. 6), гомогенизация происходит в газовую фазу. Доминирующая часть температур гомогенизации флюидных включений гомогенного захвата из разных минералов приходится на диапазон 250–300 °C (см. рис. 6), в меньшей степени – на диапазон 200–250 °C.

Существенно водные включения (тип б) гомогенизируются в интервале температур ≥295–260 °C. Из-за небольших размеров только в одном включении удалось приблизительно оценить температуру таяния льда ~-4,4 °C, что соответствует общей солености раствора ~7 масс. % экв. NaCl.

Из-за редких зерен флюорита в кварцевых жилах, а также включений в них всего удалось найти и изучить несколько первичных флюидных включений, которые представлены включениями гомогенного захвата (см. рис. 6, е, ф, г). В некоторых из них отмечаются очень мелкие твердые фазы (см. рис. 6, е), идентифицировать которые не удалось. Гомогенизация таких флюидных включений происходит в узком интервале температур ≥272–260 °C.

Температуры эвтектики меняются в узком интервале от -49 до -48 °C, что соответствует солевой системе CaCl₂-H₂O. Температуры плавления льда для этих включений несколько ниже по сравнению с аналогичными температурами для флюидных включений из других минералов и находятся в интервале -3,9...-3,7 °C, что соответствует солености 6–6,3 масс. % экв. NaCl (см. табл. 2).

Кристаллы гюбнерита насыщены большим количеством газовых включений, в редких зернах удалось обнаружить двухфазовые газозо-жидкие включения (см. рис. 6, h), которые имеют, как правило, небольшие размеры 4–10 мкм и лишь в единичных случаях достигают 15–20 мкм. Температуры гомогенизации таких включений меняются от ≥290 до 250 °C, температуры эвтектики находятся в узком интервале -55...-54 °C, который наиболее близок системе CaCl₂-NaCl-H₂O. Температуры плавления льда меняются от -6,5 до -5,7 °C. Соответственно, соленость в данном случае варьирует от 8,8 до 9,9 масс. % экв. NaCl.

В составе газовой фазы включений из кварца рудных прожилков, по данным КР-спектроскопии, идентифицирован углекислый



газ, в некоторых флюидных включениях отмечается небольшой пик азота.

Заключение

Главными жильными минералами Холтосонского месторождения являются кварц и мусковит с примесью калиевого полевого шпата и флюорита, что говорит о наличии в составе минералообразующих флюидов таких элементов, как кремний, калий, алюминий, фтор, кальций. Гюбнерит, большая часть которого, судя по идиоморфизму, отложилась в начальный период минералообразующего процесса, является главным рудным минералом Холтосонского месторождения. Однако кроме гюбнерита здесь присутствует достаточно большое количество и других рудных минералов. В общей сложности авторами диагностировано более 20 минеральных видов. Относительно большое количество минеральных видов рудных минералов (гюбнерит, сульфиды, сульфосоли и др.) свидетельствует о наличии в рудообразующих растворах таких элементов, как вольфрам, марганец, сера, железо, медь, свинец, цинк, висмут, бериллий, олово, серебро, теллур, молибден и др. В то же время главным и количественно преобладающим минералом является гюбнерит. Это может быть связано либо с высоким содержанием вольфрама относительно других элементов в растворах, либо со специфическими физико-химическими параметрами, благоприятными именно для отложения гюбнерита по сравнению с другими минералами при близких концентрациях разных рудообразующих элементов в первичном рудообразующем растворе.

Минеральный состав руд Холтосонского месторождения близок к минеральному составу ранее изученного Инкурского месторождения. Отсутствие значимых различий в минеральном составе рудных прожилков Инкурского штокерка и жил Холтосонского месторождения свидетельствует об едином источнике рудообразующих флюидов, формировавших вольфрамовое оруденение на Джидинском рудном поле.

Результаты исследования флюидных включений гомогенного захвата месторождения показали, что минимальные температуры

отложения кварца варьируют в интервале ~210–344 °С. Большинство определений попадает в диапазон 250–300 °С. Близкие температуры гомогенизации характерны для флюидных включений из флюорита и гюбнерита – 260–272 °С и 250–290 °С соответственно. Рудообразующие растворы характеризуются умеренной соленостью ~4,8–10,7 экв. NaCl, главные солевые компоненты представлены хлоридом кальция с примесью хлоридов натрия и калия. В газовой фазе включений, по данным КР-спектроскопии, присутствует углекислота. Наличие фторсодержащих минералов (флюорита, топаза, фторсодержащего мусковита) свидетельствует о присутствии соединений фтора в составе флюида. Согласно исследованиям Ф. Г. Рейфа и Е. Д. Бажеева [13], месторождения Джидинского рудного поля были сформированы при участии фторидных компонентов в гидротермальных растворах.

Наличие сингенетичных существенно водных и существенно газовых включений в кварце из руд Холтосонского месторождения позволяет оценить истинную температуру минералообразования как ~350–413 °С. Максимальные температуры гомогенизации характерны для газовых включений, сингенетичных с водными. Появление включений гетерогенного захвата в жилах Холтосонского месторождения свидетельствует о периодах вскипания, обусловленных падением давления в процессе минералообразования, вызванного, по-видимому, появлением крупных трещин, в которых формировались рудные жилы. Большое количество газовых включений в гюбнерите и сфалерите говорит о том, что их отложение, возможно, происходило при участии газовой фазы.

Предполагается, что главным фактором осаждения вольфрамитов на месторождении было понижение температуры в ходе рудоотложения, что наблюдается и на других объектах [18–20]. Высокое содержание мусковита в зальбандах рудных жил свидетельствует о повышенной кислотности минералообразующих растворов. Известно, что в щелочной гидротермальной среде растворимость вольфрамитов нечувствительна к температуре и солености раствора, тогда как в кислых растворах



снижение температуры способствует его осаждению [21, 22]. Кроме того, согласно экспериментальным данным [21], в кислых растворах растворимость гюбнерита выше, чем ферберита, практически на порядок. Данные по минеральному составу руд свидетельствуют

о повышенной кислотности рудообразующих растворов. Это позволяет считать, что главными факторами осаждения гюбнерита из гидротермальных растворов являются изменение щелочности-кислотности и снижение температуры.

Список источников

1. Damdinova L. B., Damdinov B. B., Huang X.-W., Bryansky N. V., Khubanov V. B., Yudin D. S. Age, conditions of formation, and fluid composition of the Pervomaiskoe molybdenum deposit (Dzhidinskoe ore field, South-Western Transbaikalia, Russia) // *Minerals*. 2019. Vol. 9. Iss. 10. P. 572. <https://doi.org/10.3390/min9100572>.
2. Дамдинова Л. Б., Дамдинов Б. Б. Минеральный состав и условия формирования руд Инкурского вольфрамового месторождения (Джидинское рудное поле, Юго-Западное Забайкалье) // *Науки о Земле и недропользование*. 2020. Т. 43. № 3. С. 290–306. <https://doi.org/10.21285/2686-9993-2020-43-3-290-306>.
3. Bodnar R. J., Vityk M. O. Interpretation of microthermometric data for H₂O-NaCl fluid inclusions // *Fluid inclusions in minerals: methods and application: short course of the working group (IMA) "Inclusions in Minerals"* / ed. by B. De Vivo, M. L. Frezzotti. Pontignano – Siena, 1994. P. 117–130.
4. Борисенко А. С. Изучение солевого состава газозо-жидких включений в минералах методом криометрии // *Геология и геофизика*. 1977. Т. 18. № 8. С. 16–27.
5. Малиновский Е. П. Определение пространственного положения источников рудообразующих флюидов Джидинских месторождений по данным структурного анализа // *Джидинский рудный район (проблемы развития и освоения минеральных ресурсов): сб. стат. / под ред. М. Мохосоева*. Новосибирск: Наука, 1984. С. 116–126.
6. Онтеев Д. О. Стадийность минерализации и зональность месторождений Забайкалья. М.: Наука, 1974. 244 с.
7. Батурина Е. Е., Рипп Г. С. Молибденовые и вольфрамовые месторождения Западного Забайкалья (основные черты металлогении и геохимии). М.: Наука, 1984. 152 с.
8. Гордиенко И. В., Гороховский Д. В., Смирнова О. К., Ланцева В. С., Бадмацыренова Р. А., Орсов Д. А. Джидинский рудный район: геологическое строение, структурно-металлогеническое районирование, генетические типы рудных месторождений, геодинамические условия их образования, прогнозы и перспективы освоения // *Геология рудных месторождений*. 2018. Т. 60. № 1. С. 3–37. <https://doi.org/10.7868/S001677701801001X>.
9. Дистанова А. Н. Позднепалеозойские гранитовые интрузии западной части Джидинской зоны (Западное Забайкалье) // *Гранитоидные комплексы Сибири / отв. ред. Ю.А. Кузнецов*. Вып. 440. Новосибирск: Наука, 1979. С. 3–23.
10. Ходанович П. Ю., Смирнова О. К. Вольфрамоносные березиты и локальный прогноз оруденения. Новосибирск: Наука, 1991. 208 с.
11. Ходанович П. Ю. Молибдено-вольфрамовые месторождения Джидинского рудного поля // *Месторождения Забайкалья*. Т. 1. Кн. 1. Чита – М.: Геоинформмарк, 1995. С. 149–163.
12. Чернышев И. В., Гольцман Ю. В., Баирова Э. Д., Иванова Г. Ф. Rb-Sr-геохронометрия процессов последовательного формирования гранитов, грейзенизации и гидротермальной минерализации: Джидинское W-Mo месторождение, Западное Забайкалье // *Доклады Академии наук*. 1998. Т. 360. № 4. С. 537–540.
13. Рейф Ф. Г., Бажеев Е. Д. Магматический процесс и вольфрамовое оруденение. Новосибирск: Наука, 1982. 158 с.
14. Рейф Ф. Г. Условия и механизмы формирования гранитных рудно-магматических систем (по термобарогеохимическим данным). М.: Изд-во ИМГРЭ, 2009. 498 с.
15. Стельмачонок К. З. О синхронности образования рудовмещающих трещин и формирования молибденовой минерализации на Первомайском штокверковом месторождении (Забайкалье) и причинах трещинообразования // *Доклады Академии наук*. 1994. Т. 337. № 3. С. 382–385.
16. Стельмачонок К. З. О близодновременном формировании односистемных прожилков в молибденитовом штокверковом рудном теле Джидинского месторождения (Забайкалье) // *Доклады Академии наук*. 1995. Т. 341. № 3. С. 399–402.
17. Реддер Э. Флюидные включения в минералах / пер. с англ. Д. Н. Хитарова; под ред. Л. С. Бородина. В 2 т. М.: Мир, 1987. 1188 с.
18. Heinrich C. A. The chemistry of hydrothermal tin(-tungsten) ore deposition // *Economic Geology*. 1990. Vol. 85. Iss. 3. P. 457–481. <https://doi.org/10.2113/gsecongeo.85.3.457>.
19. Samson I. M. Fluid evolution and mineralization in a subvolcanic granite stock; the Mount Pleasant W-Mo-Sn deposits, New Brunswick, Canada // *Economic Geology*. 1990. Vol. 85. Iss. 1. P. 145–163. <https://doi.org/10.2113/gsecongeo.85.1.145>.
20. Xi B. B., Zhang D. H., Zhou L. M., Zhang W. H., Wang C. Characteristics of ore-forming fluid evolution in Dajishan tungsten deposit, Quannan county, Jiangxi // *Acta Geologica Sinica*. 2008. Vol. 82. Iss. 7. P. 956–966.



21. Li J., Liu Y., Zhao Z., Chou I. M. Roles of carbonate / CO₂ in the formation of quartz-vein wolframite deposits: insight from the crystallization experiments of huebnerite in al-kali-carbonate aqueous solutions in a hydrothermal diamond-anvil cell // *Ore Geology Reviews*. 2018. Vol. 95. P. 40–48. <https://doi.org/10.1016/j.oregeorev.2018.02.024>.

oregeorev.2018.02.024.

22. Liu X., Xiao C. Wolframite solubility and precipitation in hydrothermal fluids: insight from thermodynamic modeling // *Ore Geology Reviews*. 2020. Vol. 117. P. 103289. <https://doi.org/10.1016/j.oregeorev.2019.103289>.

References

1. Damdinova L. B., Damdinov B. B., Huang X.-W., Bryansky N. V., Khubanov V. B., Yudin D. S. Age, conditions of formation, and fluid composition of the Pervomaiskoe molybdenum deposit (Dzhidinskoe ore field, South-Western Transbaikalia, Russia). *Minerals*. 2019;9(10):572. <https://doi.org/10.3390/min9100572>.

2. Damdinova L. B., Damdinov B. B. Mineral composition and formation conditions of the Inkur tungsten deposit ores (Dzhidinsky ore field, South-Western Transbaikalia). *Nauki o Zemle i nedropol'zovanie = Earth sciences and subsoil use*. 2020;43(3):290-306. (In Russ.). <https://doi.org/10.21285/2686-9993-2020-43-3-290-306>.

3. Bodnar R. J., Vityk M. O. Interpretation of microthermometric data for H₂O-NaCl fluid inclusions. In: De Vivo B., Frezzotti M. L. (eds.). *Fluid inclusions in minerals: methods and application: short course of the working group (IMA) "Inclusions in Minerals"*. Pontignano – Siena; 1994. p. 117–130.

4. Borisenko A. S. Study of the salt composition of gas-liquid inclusions in minerals by the method of cryometry. *Geologiya i geofizika*. 1977;8:16-27. (In Russ.).

5. Malinovskii E. P. Determination of spatial location of the ore-forming fluid sources of the Dzhida deposits by structural analysis data. In: Mokhosoev M. (ed.). *Dzhidinskii rudnyi raion (problemy razvitiya i osvoeniya mineral'nykh resursov) = Dzhida ore district (problems of mineral resources development and mining)*. Novosibirsk: Nauka; 1984. p. 116–126. (In Russ.).

6. Ontoev D. O. *Mineralization staging and Transbaikalia deposits zoning*. Moscow: Nauka; 1974. 244 p. (In Russ.).

7. Baturina E. E., Ripp G. S. *Molybdenum and tungsten deposits of Western Transbaikalia (the main metallogenic and geochemical features)*. Moscow: Nauka; 1984. 152 p. (In Russ.).

8. Gordienko I. V., Gorokhovskiy D. V., Smirnova O. K., Lantseva V. S., Badmatsyrenova R. A., Orsoev D. A. Dzhida ore district: geology, structural and metallogenic regionalization, genetic types of ore deposits, geodynamic conditions of their formation, forecast, and outlook for development. *Geologiya rudnykh mestorozhdenii*. 2018;60(1):3-37. (In Russ.). <https://doi.org/10.7868/S001677701801001X>.

9. Distanova A. N. Late Paleozoic granite intrusions of the western part of the Dzhida zone (Western Transbaikalia). In: Kuznetsov Yu. A. (ed.). *Granitoidnye komplekсы Sibiri = Granitoid complexes of Siberia*. Iss. 440. Novosibirsk: Nauka; 1979. p. 3–23. (In Russ.).

10. Khodanovich P. Yu., Smirnova O. K. *Tungsten-bearing beresite rocks and local mineralization forecast*. Novosibirsk: Nauka; 1991. 208 p. (In Russ.).

11. Khodanovich P. Yu. Molybdenum-tungsten deposits of the Dzhida ore field. In: *Mestorozhdeniya Zabaikal'ya = Deposits of Transbaikalia*. Vol. 1. Book 1. Chita – Moscow: Geoinformmark; 1995. p. 149–163. (In Russ.).

12. Chernyshev I. V., Gol'tsman Yu. V., Bairova E. D., Ivanova G. F. Rb-Sr-geochronometry of granite sequential formation, greisenization and hydrothermal mineralization: Dzhida W-Mo deposit, Western Transbaikalia. *Doklady Akademii nauk*. 1998;360(4):537-540. (In Russ.).

13. Reyf F. G., Bazheev E. D. *Magmatic process and tungsten mineralization*. Novosibirsk: Nauka; 1982. 158 p. (In Russ.).

14. Reyf F. G. *Formation conditions and mechanisms of granite ore-magmatic systems (by thermobarogeochemical data)*. Moscow: Institute of Mineralogy, Geochemistry, and Crystal Chemistry of Rare Elements; 2009. 498 p. (In Russ.).

15. Stel'machonok K. Z. On synchronization formation of ore hosting fractures and formation of molybdenum mineralization at the Pervomaisk stockwork deposit (Transbaikalia), and causes of fracturing. *Doklady Akademii nauk*. 1994;337(3):382-385. (In Russ.).

16. Stel'machonok K. Z. On near-simultaneous formation of single-system veins in the molybdenite stockwork ore body of the Dzhida deposit (Transbaikalia). *Doklady Akademii nauk*. 1995;341(3):399-402. (In Russ.).

17. Roedder E. Fluid inclusions in minerals; 1987. 1188 p. (Russ. ed.: *Flyuidnye vkluyucheniya v mineralakh*. Moscow: Mir; 1987. 1188 p.).

18. Heinrich C. A. The chemistry of hydrothermal tin (-tungsten) ore deposition. *Economic Geology*. 1990;85(3):457-481. <https://doi.org/10.2113/gsecongeo.85.3.457>.

19. Samson I. M. Fluid evolution and mineralization in a subvolcanic granite stock; the Mount Pleasant W-Mo-Sn deposits, New Brunswick, Canada. *Economic Geology*. 1990;85(1):145-163. <https://doi.org/10.2113/gsecongeo.85.1.145>.

20. Xi B. B., Zhang D. H., Zhou L. M., Zhang W. H., Wang C. Characteristics of ore-forming fluid evolution in Dajishan tungsten deposit, Quannan county, Jiangxi. *Acta Geologica Sinica*. 2008;82(7):956-966. (In Chinese).

21. Li J., Liu Y., Zhao Z., Chou I. M. Roles of carbonate / CO₂ in the formation of quartz-vein wolframite deposits: insight from the crystallization experiments of huebnerite in alkali-carbonate aqueous solutions in a hydrothermal diamond-anvil cell. *Ore Geology Reviews*. 2018;95:40-48. <https://doi.org/10.1016/j.oregeorev.2018.02.024>.

22. Liu X., Xiao C. Wolframite solubility and precipitation in hydrothermal fluids: insight from thermodynamic modeling. *Ore Geology Reviews*. 2020;117:103289. <https://doi.org/10.1016/j.oregeorev.2019.103289>.

**Информация об авторах / Information about the authors****Дамдинова Людмила Борисовна,**

кандидат геолого-минералогических наук,
ведущий научный сотрудник Лаборатории металлогении и рудообразования,
Геологический институт СО РАН,
г. Улан-Удэ, Россия,
ludamdinova@mail.ru,
<https://orcid.org/0000-0003-1381-4954>.

Lyudmila B. Damdinova,

Cand. Sci. (Geol. & Mineral.),
Leading Researcher of the Laboratory of Metallogeny and Ore Formation,
Geological Institute, Siberian Branch of the Russian Academy of Sciences,
Ulan-Ude, Russia,
ludamdinova@mail.ru,
<https://orcid.org/0000-0003-1381-4954>.

**Сажина Татьяна Ивановна,**

аспирант,
инженер Лаборатории металлогении и рудообразования,
Геологический институт СО РАН,
г. Улан-Удэ, Россия,
Skuratova.tatyana@list.ru,
<https://orcid.org/0000-0002-4507-6469>.

Tatyana I. Sazhina,

Postgraduate Student,
Engineer of the Laboratory of Metallogeny and Ore Formation,
Geological Institute, Siberian Branch of the Russian Academy of Sciences,
Ulan-Ude, Russia,
Skuratova.tatyana@list.ru,
<https://orcid.org/0000-0002-4507-6469>.

**Дамдинов Булат Батуевич,**

доктор геолого-минералогических наук,
заместитель директора по научной работе,
заведующий Лабораторией металлогении и рудообразования,
Геологический институт СО РАН,
г. Улан-Удэ, Россия,
damdinov@mail.ru,
<https://orcid.org/0000-0002-4142-7663>.

Bulat B. Damdinov,

Dr. Sci. (Geol. & Mineral.),
Deputy Director for Research,
Head of the Laboratory of Metallogeny and Ore Formation,
Geological Institute, Siberian Branch of the Russian Academy of Sciences,
Ulan-Ude, Russia,
damdinov@mail.ru,
<https://orcid.org/0000-0002-4142-7663>.

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 07.07.2021; одобрена после рецензирования 23.12.2021; принята к публикации 27.01.2022.

The article was submitted 07.07.2021; approved after reviewing 23.12.2021; accepted for publication 27.01.2022.



Научная статья

УДК 550.423

<https://doi.org/10.21285/2686-9993-2022-45-1-50-59>

Свойства благородных металлов золоторудного месторождения Пионер

Сергей Михайлович Радомский^a, Валентина Ивановна Радомская^b^{a,b}Институт геологии и природопользования ДВО РАН, г. Благовещенск, Россия

Автор, ответственный за переписку: Радомский Сергей Михайлович, rsm@ascnet.ru

Резюме. Целью представленного исследования являлась оценка массовых долей группы благородных металлов (золота, серебра, платины, рутения, осмия, палладия, иридия, родия) в рудах и вмещающих породах месторождения Пионер (Верхнее Приамурье, Россия), определение их миграционной активности и гидрохимической классификации металлов рудных минералов по размерностям. Объектом исследования служили первичные и окисленные руды, а также породы, вмещающие эти оруденения. В ходе работ были использованы количественный химический анализ, а также микропробирная плавка с погрешностью по правильности, точности и воспроизводимости результата $\leq 30\%$. Пионер является гидротермальным, близповерхностным месторождением с окисленными и сульфидными типами руд, которые перерабатываются как открытым способом щелочного, кучного, цианидного выщелачивания, так и закрытым, автоклавным способом соответственно. Для осуществления данных способов переработки была построена золотоизвлекательная фабрика. Главным извлекаемым компонентом по этой технологии является золото, а серебро и металлы группы платины присутствуют в промышленных продуктах в виде примесей. Технология отличается высокой рентабельностью, что позволяет экономически эффективно перерабатывать руды с массовыми долями 1–4 ppm золота. Выполненная гидрохимическая классификация размеров минералов самородного золота показала, что основная часть золотин первичных, сульфидных и окисленных руд на 74–78 % приходится на фракцию с размерами 160–1000 мкм и на 11–13 % – на фракцию с размерами 16–40 мкм. Мелкое золото месторождения способствует его полному растворению в процессе цианирования.

Ключевые слова: геохимия, благородные металлы, распределение, золоторудное месторождение Пионер, Верхнее Приамурье

Для цитирования: Радомский С. М., Радомская В. И. Свойства благородных металлов золоторудного месторождения Пионер // Науки о Земле и недропользование. 2022. Т. 45. № 1. С. 50–59. <https://doi.org/10.21285/2686-9993-2022-45-1-50-59>.

Original article

Features of noble metals at Pioneer gold deposit

Sergey M. Radomskii^a, Valentina I. Radomskaya^b^{a,b}Institute of Geology and Nature Management, Far Eastern Branch
of the Russian Academy of Sciences, Blagoveshchensk, Russia

Corresponding author: Sergey M. Radomskii, rsm@ascnet.ru

Abstract. The purpose of the present study is to evaluate the mass fractions of the group of noble metals (gold, silver, platinum, ruthenium, osmium, palladium, iridium, rhodium) in the ores and host rocks of the Pioneer deposit (the Upper Amur Region, Russia) and to determine their migration activity and hydrochemical classification of ore metals by sizes. The object of the study is primary and oxidized ores, as well as rocks hosting this mineralization. The study employs the method of quantitative chemical analysis, micro assay melting with an error of correctness, accuracy and reproducibility of the results of $\leq 30\%$. Pioneer is a near surface hydrothermal deposit with oxidized and sulfide types of ores, which are processed both by the open method of alkaline heap cyanide leaching, and by the closed pressure method, respectively. A gold concentration plant was built to implement these processing methods. The main recoverable component of this technology is gold, whereas silver and platinum group metals are present in industrial products as impurities. The technology is highly profitable, which allows cost-effective processing of ores with the mass fractions of 1–4 ppm of gold. The performed hydrochemical classification of the sizes of native gold minerals has showed that the bulk of the nuggets (74–78 %) of primary, sulfide, and oxidized ores accounts for the fraction with the sizes of 160–1000 μm and 11–13 % account for the fraction with sizes of 16–40 μm . Fine gold of the deposit provides its complete dissolution during the cyanidation process.

© Радомский С. М., Радомская В. И., 2022



Keywords: geochemistry, noble metals, distribution, Pioneer gold ore deposit, Upper Amur Region

For citation: Radomskii S. M., Radomskaya V. I. Features of noble metals at Pioneer gold deposit. *Nauki o Zemle i nedropol'zovanie = Earth sciences and subsoil use*. 2022;45(1):50-59. (In Russ.). <https://doi.org/10.21285/2686-9993-2022-45-1-50-59>.

Введение

Первые рудопроявления месторождения Пионер были открыты у одноименной деревни Амурской области в последней четверти XX в. и имеют следующие координаты: 53°28'47"N; 126°30'12"E. Исследования по поиску и разведке выполняла Лаборатория химического анализа Амурского комплексного научно-исследовательского института ДВО РАН в статусе технически компетентной и независимой испытательной лаборатории в системе сертификации ГОСТ Р (№ 00996) при Государственном комитете Российской Федерации по стандартизации и метрологии (аттестат аккредитации № РОСС RU.0001.21ПР48) в 1989–2005 гг. Анализы на благородные металлы были выполнены авторами по технике, описанной зарубежными коллегами в источнике [1]. Отбор образцов с рудного поля производили сотрудники Амурского комплексного научно-исследовательского института ДВО РАН. В Хабаровском крае были открыты месторождения металлов группы платины с концентрациями, достигающими промышленных значений в несколько десятков миллионных долей (ppm) – Кондёр, Чад и др. [2]. Вследствие этого представляется актуальным выполнить комплексное исследование на присутствие полной группы благородных металлов – золота, серебра и платиновых металлов [3]. Рудник «Пионер» находится в Амурской части сегмента Монголо-Охотского золотоносного пояса в пределах Умлеканского звена Северобуреинской золотоносной зоны [4]. В рамках исторической геологии в россыпях золота Дамбукинского рудно-россыпного узла обнаруживали минералы платиноидов [2]. В связи с этим целью представленного в данной статье исследования являлось определение значений средних концентраций благородных металлов в рудах месторождения Пионер, установление миграционных активностей и проведение гидрохимической классификации рудных металлов по размерностям. Потенциал Гиббса ΔG° показывает самопроизвольно протекающий химический процесс [5].

Материалы и методы исследования

Образцы проб минерального сырья в количестве 1–3 кг были измельчены до размерности <100 мкм, отквартованы и сокращены по рекомендациям Центрального научно-исследовательского геологоразведочного института цветных и благородных металлов и Всероссийского научно-исследовательского института минерального сырья им. Н. М. Федоровского, применяемым при проведении физико-химических исследований золоторудных месторождений. Масса используемой лабораторной навески при анализах группы благородных металлов составила 10 г [6, 7].

Для гидрохимической классификации частиц благородных металлов готовились пульпы из измельченных до 75 мкм образцов первичных и окисленных руд [8].

Количественный химический анализ соответствовал третьей категории точности количественных определений с правильностью, приборной погрешностью и вариацией результата $\leq 30\%$. Для аналитического контроля были использованы стандарт № 1702-86 и стандарт № 1703-86 [6, 7, 9].

Платиновые металлы определялись микропробирной плавкой [7, 9] измельченных образцов минерального сырья до размеров <100 мкм. Металлы группы платины выщелачивались в колбу объемом 25 мл, и аликвоты определялись методом атомно-абсорбционного анализа. Результат контролировался методами инверсионного вольтамперометрического анализа [10]. В ходе работы использовались современные методические указания [11].

Соотношения ионных (окисленных) и металлических (восстановленных) форм составляют в сумме валовые концентрации благородных металлов. Они разделялись после кипячения в разбавленной соляной кислоте (1:4) и отфильтровывались холодными [12]. Ионные формы определяют миграционный потенциал $E_{\text{мigr.}}$, В, по формуле

$$E_{\text{мigr.}} = \frac{0,059}{n} \lg \frac{C_{\text{БМ}^{n+}}^a}{C_{\text{БМ}}^q},$$



где n – количество отданных электронов; a – стехиометрический коэффициент при окисленной форме благородных металлов; q – стехиометрический коэффициент при восстановленной форме благородных металлов [13].

Для правильности результата образцы обрабатывались плавиковой кислотой, которая впоследствии отгонялась выпариванием.

Результаты исследования

Месторождение Пионер расположено у истоков р. Улунги и включает в себя зоны гидротермалитов с золотым оруденением, представленным в глинах и неогеновых озерно-аллювиальных песках, а рудные штокерковые зоны (Звёздочка, Западная, Южная, Промежуточная, Бахмут, Андреевская, Николаевская, Бахмут – Северо-Восточная, Эрозионная, Отвальная и др.) находятся в разломах и зонах трещиноватости [14].

Рудные зоны в своей центральной части сложены брекчиями с кварцевым цементом, к периферии переходящими в прожилково-окварцованные породы, в которых и формируются окисленные руды из сульфидных рудопроявлений первичных руд, где на массовую долю сульфидов приходится 5–8 % общего количества серы.

На месторождении до глубины 300 м выявлены элементы вертикальной зональности в распределении жильных рудных минералов и их ассоциаций. От приповерхностных и верхних горизонтов к нижним (глубоким) последовательно изменяются количественные отношения среди алюмосиликатных минералов [14]. Пример последовательности минералов из этого класса: гидрослюда (адуляр) → серицит → полевые шпаты. В этом же направлении происходит смена минеральных ассоциаций. От поверхности на глубину золото-карбонат-кварцевая ассоциация сменяется золото-адуляр-кварцевой, далее – золото-сульфосольно-антимонитовой и завершается золото-халькопирит-галенитовой ассоциацией. Вертикальная зональность местами переходит в боковые ответвления. Продуктивными в отношении золотого оруденения являются кварц-калишпат-серицит-альбитовые вторичные изменения, сопровождающиеся образованием

прожилков серого тонкозернистого коллоидного, белого фарфорообразного и друзовидного кварца, также с тонкими вкраплениями сульфидов, с баритом и сульфосолями свинца [15].

Рудные поля заняты интрузиями: субвулканическими гранит-порфирами, разнообразными гранодиоритами верхнеамурского комплекса, среднезернистыми роговообманковыми и биотит-роговообманковыми кварцевыми диоритами буриндинского комплекса, обладающими высокой намагниченностью. Существенное влияние на формирование месторождения оказал Покровский палеовулкан, находящийся примерно в 35 км, в жерле которого также сформировалось крупное золоторудное месторождение, границы рудных полей вследствие воздействий вулканогенного тепла и гидротермальных растворов также существенно расширились [16]. Снижение температуры золотосодержащего флюида вело к падению растворимости золота и к его отложению в рудовмещающих структурах месторождения Пионер (табл. 1).

Выделения золота можно дополнительно разделить на две подгруппы по пробе самородного золота: первая находится дальше от Покровского палеовулкана на северо-восточной возвышенности месторождения и имеет пробу 710–780 ‰, вторая находится в низине на юго-западе рудопроявления в древних руслах гидротермальных потоков, имеет пробу 800–980 ‰ и относится к гипергенной подгруппе руд. Цвет выделений самородного золота изменяется от светло-желтого до зеленоватого и сгущенного коричневатого в природных пленках. Это явление также описано в источнике [17], но в связи с тонкостью пленок широкого распространения оно не получило [18]. Показано, что руды гидротермальных золоторудных месторождений, расположенные вблизи от поверхности, испытывают окислительное воздействие вмещающей среды и подразделяются на первичные и окисленные руды, условная граница между которыми характеризуется окислительно-восстановительным потенциалом +0,36 В, обеспечиваемым равенством концентраций ионов $[\text{Fe}]^{3+} = [\text{Fe}]^{2+}$ или минералогическим критерием – равенством концентраций гематита и пирита.



Таблица 1. Массовые доли благородных металлов в первичных рудах, окисленных рудах и вмещающих породах золоторудного месторождения Пионер (числитель – интервал определяемых содержаний, знаменатель – среднее значение, n – число проб), а также их кларк в земной коре

Table 1. Mass fractions of noble metals in primary ores, oxidized ores and host rocks of the Pioneer gold deposit (numerator – interval of determining content, denominator – average value, n – number of samples), as well as their clarke in the earth's crust

Элемент	Массовая доля, ppm			Кларк в земной коре [19]
	Первичные руды, $n = 24$	Окисленные руды, $n = 24$	Вмещающие породы, $n = 24$	
Au	<u>1,24–3,96</u> 2,6	<u>0,79–3,37</u> 2,08	<u>0,031–0,055</u> 0,042	0,0025
Ag	<u>1,17–3,86</u> 2,52	<u>0,16–0,62</u> 0,39	<u>0,0011–0,0016</u> 0,0014	0,07
Pt	<u>0,45–0,59</u> 0,52	<u>0,41–0,56</u> 0,48	<u>0,0005–0,001</u> 0,0008	0,0004
Ru	<u>0,012–0,056</u> 0,034	<u>0,011–0,036</u> 0,023	<u>0,005–0,008</u> 0,007	0,0001
Os	<u>0,011–0,019</u> 0,015	<u>0,008–0,013</u> 0,011	<u>0,0001–0,0003</u> 0,0002	0,00005
Pd	<u>0,003–0,029</u> 0,016	<u>0,001–0,024</u> 0,012	<u>0,0004–0,0006</u> 0,0005	0,0004
Ir	<u>0,001–0,009</u> 0,005	<u>0,001–0,006</u> 0,003	<u>0,0001–0,0001</u> 0,0001	0,00005
Rh	<u>0,001–0,005</u> 0,003	<u>0,001–0,003</u> 0,002	<u>0,0002–0,0005</u> 0,0004	0,00006

Валовые концентрации благородных металлов статистически значимо превышают кларки в земной коре в несколько десятков раз в рудах и превышают до десятка раз концентрации во вмещающих породах. Исключением становится серебро, что является особенностью большинства месторождений Приамурья [13, 19] (см. табл. 1). Первичные и окисленные руды заключены во вмещающие породы, где основным минералом является альбит. Значительное влияние на руды месторождения оказывает окислительно-восстановительный потенциал, который убывает при продвижении в глубокие слои пород¹.

Рядовые геохимические пробы руд месторождения обеднены по золоту (0,8–4 ppm) и серебру (0,2–3,9 ppm), им сопутствуют массовые доли платиновых металлов в количествах до 0,7 ppm, которые не представляют промышленного интереса для переработки и извлечения (см. табл. 1). Тем не менее на рудном поле месторождения довольно часто встречаются выходы штокверков и рудных

столбов с концентрациями в них золота до 1830 ppm и серебра до 1032 ppm. Окисленные руды легче перерабатываются по технологическим схемам и имеют больший процент выхода золота и серебра вследствие природной работы окислительных процессов, предваряющих технологическую переработку руд и снижение материальных затрат компонентов технологии на окисление первичных руд, рентабельность добычи из которых не превышала 70 % [14]. В выходах штокверков и рудных столбов отмечались максимальные концентрации платиноидов, зачастую превосходящие данные (см. табл. 1).

Связей с глубинными процессами благороднометалльной минерализации установлено не было, поэтому закономерности оруденений, описанных в источниках [20, 21], не были выявлены [22].

Самородное золото на месторождении относится к разряду мелкого (табл. 2), что также благотворно сказывается на процессе щелочного кучного выщелачивания и позволяет

¹ Mann A. W., Mann A. T., Humphreys D. B., Dowling S. E., Staltari S., Myers L. Soil geochemical anomalies – their dynamic nature and interpretation: report. Perth: Mineral and Energy Research Institute of Western Australia, 1997. 184 p.



вести технологическую отработку с высокими показателями рентабельности производственного цикла. В табл. 2 отчетливо просматриваются два суммарных класса выделений минералов самородного золота по классу крупности образований: выделения 1–40 мкм, цементирующие выделения 1–3 мкм, доминирующие в первичных сульфидных выделениях руд, а также выделения 160–1000 мкм, характерные для зоны гипергенеза месторождения Пионер. С уменьшением размера минералов на них возрастает доля окисленных форм благородных металлов.

Значения концентраций окисленной формы благородных металлов, определяющих количества мигрирующих форм, представлены в табл. 3. Они находятся в одном интервале концентраций платиновых металлов в поверхностных водах, приведенных в исследованиях² [12, 20, 21]. Содержания растворенного кислорода до 10 мг/дм³ и озона до 0,9 мг/дм³ в природных водах Амурского региона обеспечивают более высокие значения окислительно-восстановительного потенциала среды до +2,07 В³.

На процесс миграции влияют электрические поля как восстановленных форм платиноидов, так и мигрирующих окисленных форм, создающих потоки рассеивания благородных металлов и являющихся маркерами для геохимических поисков месторождений платиноидов. При этом электрические поля проявляются как в твердом, так и в растворенном гидрохимическом состоянии благородных металлов⁴.

Элементы группы платины Верхнеамурской провинции представлены следующими минералами: платиной (Pt), сперрилитом (PtAs₂), иридосминами (Ir-Os), осмииридами (Os-Ir), полисульфидами из твердых смесей

ириарсита (IrAsS) [13]. Также окисдными пленками на поверхности минералов самородных благородных металлов они образуют окисленные формы благородных металлов и имеют отрицательный потенциал миграционной составляющей в потоках геохимических ореолов рассеивания минералов рудных тел. Минеральные же формы представлены в основном самородными благородными металлами (см. табл. 3). В связи с этим при обработке раствором концентрированной соляной кислоты при кипячении все перечисленные выше минералы за исключением сплавов осмиридов и иридосминов растворяются и переходят в комплексные окисленные формы, представленные в табл. 3. На химические и механические компактные формы платиновых металлов очень сильное влияние оказывают примеси⁵. Химические свойства платиновых металлов тождественны для элементов, расположенных в подгруппе в одном столбце периодической таблицы химических элементов Д. И. Менделеева: Ru-Os, Rh-Ir, Pd-Pt. Наиболее химически активны из всех платиновых металлов осмий и рутений, наименее активны иридий и родий, платина и палладий⁶.

Заключение

В целях переработки руд месторождения Пионер был выбран открытый способ щелочного кучного цианидного выщелачивания, для осуществления которого была построена золотоизвлекательная фабрика. Фабрика работает круглогодично: в зимний период осуществляется подготовка / разборка куч конгломератов и извлечения золота из концентратов на конвейере для окисленных типов руд, тогда как в летний период осуществляется кучное выщелачивание. Технология

² Mann A. W., Mann A. T., Humphreys D. B., Dowling S. E., Staltari S., Myers L. Soil geochemical anomalies – their dynamic nature and interpretation: report. Perth: Mineral and Energy Research Institute of Western Australia, 1997. 184 p.

³ Лурье Ю. Ю. Справочник по аналитической химии. М.: Альянс, 2007. 447 с.

⁴ Сенчина Н. П. Поиски коренной платиноидной минерализации путем изучения естественных электрических полей и ореолов рассеивания подвижных форм нахождения химических элементов: дис. ... канд. геол.-минерал. наук. СПб., 2017. 155 с.

⁵ Сенчина Н. П. Поиски коренной платиноидной минерализации путем изучения естественных электрических полей и ореолов рассеивания подвижных форм нахождения химических элементов: дис. ... канд. геол.-минерал. наук. СПб., 2017. 155 с.

⁶ Лурье Ю. Ю. Справочник по аналитической химии. М.: Альянс, 2007. 447 с.



Таблица 2. Содержание золота и серебра во фракциях интервалов классификации микрометр для выборок минерального сырья первичных и окисленных типов руд месторождения Пионер (n – число проб)
Table 2. Gold and silver content in the fractions of the intervals of the micrometer classification for the samples of mineral raw materials of primary and oxidized ore types of the Pioneer deposit (n – number of samples)

Фракция, мкм	Первичные руды, $n = 24$		Окисленные руды, $n = 24$	
	Au, масс. %	Ag, масс. %	Au, масс. %	Ag, масс. %
3000–1000	0,38	0,21	0,24	0,12
1000–160	74,2	77,35	76,06	77,47
160–80	2,83	5,14	2,13	3,18
80–40	1,19	1,17	2,1	2,43
40–16	12,56	8,1	11,8	5,38
16–10	3,72	2,12	1,31	1,74
10–1	3,25	2,1	1,15	2
1–0,45	0,84	0,89	2,23	1,89
0,45–0,2	0,67	1,01	0,94	1,61
0,20–0,1	0,15	0,72	0,8	1,19
0,10–0,05	0,11	0,97	0,66	1,57
0,05–0,001	0,1	0,22	0,58	1,42
Концентрация, ppm	0,76	0,35	0,57	0,32

Таблица 3. Концентрации благородных металлов в мигрирующих формах и поверхностных водах золоторудного месторождения Пионер (числитель – интервал определяемых содержаний, знаменатель – среднее значение, n – число проб), а также их миграционный потенциал
Table 3. Concentrations of noble metals in migrating forms and surface waters of the Pioneer gold deposit (numerator – the interval of determining contents, denominator – average value, n – number of samples) and their migration potential

Элемент	Концентрация, ppm		Миграционный потенциал, В
	Мигрирующие формы, $n = 24$	Поверхностные воды, $n = 24$	
Au	$\frac{0,04-0,17}{0,09}$	$\frac{0,0002-0,0005}{0,00035}$	-0,13
Ag	$\frac{0,005-0,036}{0,01}$	$\frac{0,00011-0,00016}{0,00014}$	-0,24
Pt	$\frac{0,02-0,052}{0,022}$	$\frac{0,00002-0,00004}{0,00003}$	-0,1
Ru	$\frac{0,001-0,009}{0,005}$	$\frac{0,00002-0,00001}{0,00002}$	-0,14
Os	$\frac{0,0001-0,0002}{0,0002}$	$\frac{0,00001-0,00003}{0,00002}$	-0,22
Pd	$\frac{0,0002-0,0008}{0,0006}$		-0,19
Ir	$\frac{0,0001-0,0014}{0,0006}$	$\frac{0,00001-0,00001}{0,00001}$	-0,13
Rh	$\frac{0,0003-0,0006}{0,0004}$		-0,14

отличается высокой рентабельностью, что позволяет экономически эффективно перерабатывать руды с массовыми долями 1–4 ppm золота, характерные для месторождения. Главным извлекаемым компонентом по этой технологии является золото, а серебро и металлы группы платины присутствуют в промышленных продуктах в виде примесей. К

настоящему моменту запасы легкоцианируемых окисленных руд на месторождении закончились, а возможности расширения границ за счет соседних рудопроявлений достигли предела рентабельности. Для продолжения производственной деятельности на фабрике было установлено четыре автоклава для отжига сульфидной серы в «упорных» для



цианирования первичных типах руд. В автоклавах концентраты сульфидных руд окисляются при 500 К в течение получаса и далее перерабатываются по традиционной схеме, описанной выше. Эта технология отличается большей глубиной дезинтеграции минерального сырья, что увеличивает извлечение как главного компонента – золота, так и сопутствующих ему примесей других благородных металлов. Кроме того, при замене открытого способа переработки на закрытый значительно уменьшается токсическое влияние производства, оказываемое на окружающую среду.

Таким образом, на основе всего вышесказанного можно сделать следующие выводы:

1. Для руд месторождения Пионер вулканогенного класса, относящихся к эндогенным первичным и экзогенным окисленным типам руд, впервые выполнена гидрохимическая классификация по размерам рудных минералов и определены средние сопутствующие концентрации металлов группы платины.

2. По классам крупности выделяются минералы самородного золота в рудах первичного типа, связанные с минералами вмещающей среды класса крупности 1–40 мкм, на которые приходится 16,5 % выделений минералов золота, и минералы самородного золота окисленных руд, связанные с минералами класса крупности 160–1000 мкм, на которые приходится 76 % выделений самородного золота.

3. Средние концентрации сопутствующих платиноидов для первичных и окисленных типов руд находятся в интервале <1 ppm и не достигают значений индивидуальной рентабельной промышленной переработки.

4. Методами термодинамики определены интервалы концентраций окисленных и восстановленных форм благородных металлов, а также соответствующие им миграционные потенциалы, имеющие отрицательные значения и сдерживающие трансграничную миграцию с рудного поля месторождения.

Список источников

1. Ferreira S. L. C, Bezerra M. A., Santos A. S., dos Santos W. N. L, Novaes C. G., de Oliveira O. M. C., et al. Atomic absorption spectrometry – a multi element technique // *Trends in Analytical Chemistry*. 2018. Vol. 100. P. 1–6. <https://doi.org/10.1016/j.trac.2017.12.012>.
2. Моисеенко В. Г., Степанов В. А., Эйриш А. В., Мельников А. В. Платиноносность Дальнего Востока. Владивосток: Дальнаука, 2004. 176 с.
3. Ni W., Mao X., Zhang H., Liu L., Gao X., Xiao F. Lead fire assay preconcentration and high resolution continuum source graphite furnace atomic absorption spectrometry for the determination of ultra-trace amounts of Au, Ir, Pd, Pt and Rh in rocks and minerals // *Spectrochimica Acta. Part B: Atomic Spectroscopy*. 2019. Vol. 158. P. 105643. <https://doi.org/10.1016/j.sab.2019.105643>.
4. Хомич В. Г., Борискина Н. Г. Геологическая позиция благороднометалльных месторождений интрузивно-вулканического обрамления Гонжинского выступа докембрия (Верхнее Приамурье) // *Тихоокеанская геология*. 2006. Т. 25. № 3. С. 53–65.
5. Гаррелс Р. М., Крайст Ч. Л. Растворы, минералы, равновесия / пер. с англ. М.: Мир, 1968. 368 с.
6. Кубракова И. В., Никулин А. В., Кощеева И. Я., Тютюнник О. А. Платиновые металлы в окружающей среде: содержание, определение, поведение в природных системах // *Химия в интересах устойчивого развития*. 2012. Т. 20. № 6. С. 645–656.
7. Радомский С. М., Радомская В. И. Группа благородных металлов на Токурском золоторудном месторождении Приамурья // *Геология и минерально-сырьевые ресурсы Сибири*. 2019. № 1. С. 51–56. <https://doi.org/10.20403/2078-0575-2019-1-51-56>.
8. Радомский С. М., Радомская В. И. Классификация выделений минералов самородного золота Покровского золоторудного месторождения Приамурья // *Горный информационно-аналитический бюллетень (научно-технический журнал)*. 2013. № 6. С. 88–92.
9. Ni W., Mao X., Zhang H. Determination of ultra-trace platinum, palladium, ruthenium, rhodium, and iridium in rocks and minerals by inductively coupled – plasma mass spectrometry following nickel sulfide fire assay preconcentration and open mixed acid digestion // *Analytical Letters*. 2019. Vol. 52. Iss. 11. P. 1699–1710. <https://doi.org/10.1080/00032719.2019.1566348>.
10. Колпакова Н. А. Определение платиновых металлов в минеральном сырье методом инверсионной вольтамперометрии (обзор) // *Заводская лаборатория. Диагностика материалов*. 2014. Т. 80. № 9. С. 5–13.
11. Bedard L. P., Esbensen K. H., Barnes S. J. Empirical approach for estimating reference material heterogeneity and sample minimum test portion mass for “Nuggety” precious metals (Au, Pd, Ir, Pt, Ru) // *Analytical Chemistry*. 2016. Vol. 88. Iss. 7. P. 3504–3511. <https://doi.org/10.1021/acs.analchem.5b03574>.
12. Kerstin L., Philippe A., Wörle K., Schaumann G. E. Analytical strategies to the determination of metal-containing nanoparticles in environmental waters // *Trends in Analytical Chemistry*. 2016. Vol. 84. P. 107–120. <https://doi.org/10.1016/j.trac.2016.03.026>.
13. Радомский С. М. Естественный миграционный



потенциал благородных металлов Монголо-Охотского золотоносного пояса // Известия Томского политехнического университета. Инжиниринг георесурсов. 2017. Т. 328. № 1. С. 29–38.

14. Власов Н. Г., Курник Л. П. Роль субмеридиональных геологических структур в формировании рудных узлов Приамурья // Разведка и охрана недр. 2013. № 11. С. 7–11.

15. Хомич В. Г., Власов Н. Г., Борискина Н. Г., Маслаков В. С. Геологическая позиция и особенности строения Пионерного золоторудного месторождения (Верхнее Приамурье) // Геология, минералогия и геохимия месторождений благородных металлов Востока России и новые технологии переработки благороднометалльного сырья: сб. науч. тр. / ред. В. Г. Моисеенко, А. П. Сорокин. Благовещенск: Изд-во ИГиП ДВО РАН, 2005. С. 121–125.

16. Goldberg I. S. Vertical migration of elements from mineral deposits // Journal of Geochemical Exploration. 1998. Vol. 61. Iss. 1–3. P. 191–202. [https://doi.org/10.1016/S0375-6742\(97\)00045-9](https://doi.org/10.1016/S0375-6742(97)00045-9).

17. Альбов М. Н., Быбочкин А. М. Рудничная геология. М.: Недра, 1973. 430 с.

18. Ивенсен Ю. П., Левин В. И. Генетические золотооруденения и золоторудные формации // Золоторудные формации и геохимия золота Верхояно-Чукотской складчатой области: сб. стат. / отв. ред. Ю. П. Ивенсен. М.: Наука, 1975. С. 5–120.

19. Wedepohl K. H. The composition of the continental crust // Geochemica et Cosmochimica Acta. 1995. Vol. 59. Iss. 7. P. 1217–1232. [https://doi.org/10.1016/0016-7037\(95\)00038-2](https://doi.org/10.1016/0016-7037(95)00038-2).

20. Mann A. W., Birrel R. D., Fedikow M. A. F., de Souza H. A. F. Vertical ionic migration: mechanisms, soil anomalies, and sampling depth for mineral exploration of Souza Geological Society of London // Geochemistry: Exploration, Environment, Analysis. 2005. Vol. 5. Iss. 3. P. 201–210. <https://doi.org/10.1144/1467-7873/03-045>.

21. Cameron E. M., Hamilton S. M., Leybourne M. I., Hall G. E. M., McClenaghan M. B. Finding deeply buried deposits using geochemistry // Geochemistry: Exploration, Environment, Analysis. 2004. Vol. 4. Iss. 1. P. 7–32. <https://doi.org/10.1144/1467-7873/03-019>.

22. Шнейдерхен Г. Рудные месторождения / пер. с нем. М.: Иностранная литература, 1958. 502 с.

References

1. Ferreira S. L. C., Bezerra M. A., Santos A. S., dos Santos W. N. L., Novaes C. G., de Oliveira O. M. C., et al. Atomic absorption spectrometry – a multi element technique. *Trends in Analytical Chemistry*. 2018;100:1-6. <https://doi.org/10.1016/j.trac.2017.12.012>.

2. Moiseenko V. G., Stepanov V. A., Eirish A. V., Mel'nikov A. V. *Platinum reserves of the Far East*. Vladivostok: Dal'nauka; 2004. 176 p. (In Russ.).

3. Ni W., Mao X., Zhang H., Liu L., Gao X., Xiao F. Lead fire assay preconcentration and high resolution continuum source graphite furnace atomic absorption spectrometry for the determination of ultra-trace amounts of Au, Ir, Pd, Pt and Rh in rocks and minerals. *Spectrochimica Acta. Part B: Atomic Spectroscopy*. 2019;158:105643. <https://doi.org/10.1016/j.sab.2019.105643>.

4. Khomich V. G., Boriskina N. G. The geological position of precious-metal deposits of intrusive-volcanogenic framing of the Precambrian Gonzhinsky protrusion (Upper Priamurye). *Tikhookeanskaya geologiya*. 2006;25(3):53-65. (In Russ.).

5. Garrels R. M., Christ Ch. L. Solutions, minerals and equilibria; 1965. 450 p. (Russ. ed.: *Rastvory, mineraly, ravnovesiya*. Moscow: Mir; 1968. 368 p.).

6. Kubrakova I. V., Nikulin A. V., Koshcheeva I. Ya., Tyutyunnik O. A. Platinum metals in the environment: content, determination, behavior in natural systems. *Khimiya v interesakh ustoychivogo razvitiya*. 2012;20(6):645-656. (In Russ.).

7. Radomskii S. M., Radomskaya V. I. Group of precious metals at the Tokur gold deposit of Priamurye. *Geologiya i mineral'no-syrovyye resursy Sibiri = Geology and mineral resources of Siberia*. 2019;1:51-56. (In Russ.). <https://doi.org/10.20403/2078-0575-2019-1-51-56>.

8. Radomskii S. M., Radomskaya V. I. Classification of isolations minerals native gold of Pokrovskiy gold-ore layer

of the Amur Region. *Gornyi informatsionno-analiticheskiy byulleten' (nauchno-tekhnicheskii zhurnal) = Mining informational and analytical bulletin (scientific and technical journal)*. 2013;6:88-92. (In Russ.).

9. Ni W., Mao X., Zhang H. Determination of ultra-trace platinum, palladium, ruthenium, rhodium, and iridium in rocks and minerals by inductively coupled – plasma mass spectrometry following nickel sulfide fire assay preconcentration and open mixed acid digestion. *Analytical Letters*. 2019;52(11):1699-1710. <https://doi.org/10.1080/00032719.2019.1566348>.

10. Kolpakova N. A. Stripping voltammetry in determination of platinum group metals in mineral raw materials (review). *Zavodskaya laboratoriya. Diagnostika materialov*. 2014;80(9):5-13. (In Russ.).

11. Bedard L. P., Esbensen K. H., Barnes S. J. Empirical approach for estimating reference material heterogeneity and sample minimum test portion mass for "Nuggety" precious metals (Au, Pd, Ir, Pt, Ru). *Analytical Chemistry*. 2016;88(7):3504-3511. <https://doi.org/10.1021/acs.analchem.5b03574>.

12. Kerstin L., Philippe A., Wörle K., Schaumann G. E. Analytical strategies to the determination of metal-containing nanoparticles in environmental waters. *Trends in Analytical Chemistry*. 2016;84:107-120. <https://doi.org/10.1016/j.trac.2016.03.026>.

13. Radomskiy S. M. Natural migration potential of noble metals of Mongol-Okhotsk gold belt. *Izvestiya Tomskogo politekhnicheskogo universiteta. Inzhiniring georesursov = Bulletin of the Tomsk Polytechnic University. Geo Assets Engineering*. 2017;328(1):29-38. (In Russ.).

14. Vlasov N. G., Kurnik L. P. Role of submeridional geological structures in the formation of ore clusters in the Amur region. *Razvedka i okhrana nedr = Prospect and protection of mineral resources*. 2013;11:7-11. (In Russ.).



15. Khomich V. G., Vlasov N. G., Boriskina N. G., Maslakov V. S. Geological position and structural features of the Pioneer gold field (Upper Amur Region). In: Moiseenko V. G., Sorokin A. P. (eds.). *Geologiya, mineralogiya i geokhimiya mestorozhdenii blagorodnykh metallov Vostoka Rossii i novye tekhnologii pererabotki blagorodnometall'nogo syr'ya* = *Geology, mineralogy and geochemistry of precious metal deposits in the Russian East and new processing technologies for precious metal raw materials*. Blagoveshchensk: Institute of Geology and Nature Management FEB RAS; 2005, p. 121–125. (In Russ.).

16. Goldberg I. S. Vertical migration of elements from mineral deposits. *Journal of Geochemical Exploration*. 1998;61(1-3):191-202. [https://doi.org/10.1016/S0375-6742\(97\)00045-9](https://doi.org/10.1016/S0375-6742(97)00045-9).

17. Al'bov M. N., Bybochkin A. M. *Mining geology*. Moscow: Nedra; 1973. 430 p. (In Russ.).

18. Ivensen Yu. P., Levin V. I. Genetic gold mineralizations and gold formations. In: Ivensen Yu. P. (ed.). *Zolotorudnye formatsii i geokhimiya zolota Verkhoyano-Chukotskoi skladchatoi oblasti* = *Gold ore formations and*

gold geochemistry of the Verkhoyansk-Chukotka folded region. Moscow: Nauka; 1975, p. 5–120. (In Russ.).

19. Wedepohl K. H. The composition of the continental crust. *Geochemica et Cosmochimica Acta*. 1995;59(7):1217-1232. [https://doi.org/10.1016/0016-7037\(95\)00038-2](https://doi.org/10.1016/0016-7037(95)00038-2).

20. Mann A. W., Birrel R. D., Fedikow M. A. F., de Souza H. A. F. Vertical ionic migration: mechanisms, soil anomalies, and sampling depth for mineral exploration de Souza Geological Society of London. *Geochemistry: Exploration, Environment, Analysis*. 2005;5(3):201-210. <https://doi.org/10.1144/1467-7873/03-045>.

21. Cameron E. M., Hamilton S. M., Leybourne M. I., Hall G. E. M., McClenaghan M. B. Finding deeply buried deposits using geochemistry. *Geochemistry: Exploration, Environment, Analysis*. 2004;4(1):7-32. <https://doi.org/10.1144/1467-7873/03-019>.

22. Schneiderhöhn H. Ore deposits; 1942. 502 p. (Russ. ed.: *Rudnye mestorozhdeniya*. Moscow: Inostrannaya literatura; 1958. 502 p.).

Информация об авторах / Information about the authors



Радомский Сергей Михайлович,

кандидат геолого-минералогических наук,
научный сотрудник Лаборатории рудогенеза,
Институт геологии и природопользования ДВО РАН,
г. Благовещенск, Россия,
rsm@ascnet.ru,
<https://orcid.org/0000-0002-8522-5510>.

Sergey M. Radomskii,

Cand. Sci. (Geol. & Mineral.),
Researcher of the Ore Genesis Laboratory,
Institute of Geology and Nature Management,
Far Eastern Branch of the Russian Academy of Sciences,
Blagoveshchensk, Russia,
rsm@ascnet.ru,
<https://orcid.org/0000-0002-8522-5510>.



Радомская Валентина Ивановна,

кандидат химических наук,
ведущий научный сотрудник Лаборатории биогеохимии,
Институт геологии и природопользования ДВО РАН,
г. Благовещенск, Россия,
radomskaya@ascnet.ru,
<https://orcid.org/0000-0002-3023-7565>.

Valentina I. Radomskaya,

Cand. Sci. (Chem.),
Leading Researcher of the Biogeochemistry Laboratory,
Institute of Geology and Nature Management,
Far Eastern Branch of the Russian Academy of Sciences,
Blagoveshchensk, Russia,
radomskaya@ascnet.ru,
<https://orcid.org/0000-0002-3023-7565>.

Вклад авторов / Contribution of the authors

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



Конфликт интересов / Conflict of interests

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

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

Информация о статье / Information about the article

Статья поступила в редакцию 03.12.2021; одобрена после рецензирования 12.01.2022; принята к публикации 09.02.2022.

The article was submitted 03.12.2021; approved after reviewing 12.01.2022; accepted for publication 09.02.2022.

РАЗВЕДКА И РАЗРАБОТКА
МЕСТОРОЖДЕНИЙ ПОЛЕЗНЫХ ИСКОПАЕМЫХ

Научная статья

УДК 550.822.7

<https://doi.org/10.21285/2686-9993-2022-45-1-60-72>Бурение скважин с комбинированным
регулированием давленияВиталий Иванович Зайцев^a, Александр Владимирович Карпиков^b^{a,b}Иркутский национальный исследовательский технический университет, г. Иркутск, Россия

Автор, ответственный за переписку: Зайцев Виталий Иванович, zaicshev@istu.edu

Резюме. В рамках данного исследования проведен анализ новых технологий бурения нефтяных и газовых скважин, к числу которых относится технология бурения с регулируемым давлением. В ходе исследования рассмотрено оборудование для создания дифференциального давления в системе «скважина – пласт», поставляемое такими международными компаниями, как Schlumberger, M-I SWACO, AKROS и др. Проведен анализ применения базового комплекса оборудования для бурения с регулируемым давлением, в который входят установка управления противодавлением, азотная компрессорная станция, штуцерный манифольд, сепаратор, роторный устьевой герметизатор, факельная вышка с системой зажигания и программно-аппаратный комплекс. Рассмотрены варианты реализации технологии бурения с регулируемым давлением путем применения герметизированной системы циркуляции, которая упрощает схему промывки скважины и обеспечивает плавное регулирование давления промывочного агента на забой. Исследована реальная возможность представляемого базового оборудования для бурения с регулируемым давлением с помощью комплекса программно-аппаратного обеспечения определять допускаемые значения давления гидроразрыва пласта и пластового давления для повсеместного контроля профиля давления в затрубном пространстве. Установлено, что бурение с регулируемым давлением как принципиально новая для гидродинамических условий залежи технология первичного вскрытия пласта позволяет реализовать бурение в зонах практически с любым по начальной интенсивности поглощением: в ходе работ мы не останавливаем проходку (то есть циркуляцию) и не повышаем эквивалентное давление «на горизонт», зависящее от эквивалентной циркуляционной плотности – регулирование заключается в приближении эквивалентного давления «на горизонт» к пластовому давлению. Технологический процесс бурения с регулируемым давлением с использованием рассматриваемого оборудования поможет буровому персоналу лучше понять эффективность данной методики бурения и будет способствовать ее более осмысленному применению отечественными фирмами.

Ключевые слова: коллектор, первичное вскрытие, бурение, пластовое давление

Для цитирования: Зайцев В. И., Карпиков А. В. Бурение скважин с комбинированным регулированием давления // Науки о Земле и недропользование. 2022. Т. 45. № 1. С. 60–72. <https://doi.org/10.21285/2686-9993-2022-45-1-60-72>.

EXPLORATION AND DEVELOPMENT OF MINERAL DEPOSITS

Original article

Well drilling with combined pressure control

Vitaly I. Zaitsev^a, Alexander V. Karpikov^b^{a,b}Irkutsk National Research Technical University, Irkutsk, Russia

Corresponding author: Vitaly I. Zaitsev, zaicshev@istu.edu

Abstract. The research deals with the analysis of new technologies for drilling oil and gas wells including the technology of managed pressure drilling (MPD). A consideration is given to the equipment for creating differential pressure in the well-reservoir system, which is supplied by the foreign companies Schlumberger, M-I SWACO, AKROS, etc. The analysis is given to the application of the basic complex of managed pressure drilling equipment, which includes the installation of back-pressure control, nitrogen compressor station, choke manifold, separator, rotary wellhead dock, flare tower with ignition system and hardware and software complex. The article also deals with the implementation options of the managed pressure drilling technology through the use of a sealed circulation system, which simplifies the well flushing scheme and



ensures smooth adjustment of the flushing agent pressure at the bottomhole. A viable possibility of the presented basic MPD equipment and the attached software and hardware complex to determine the permissible values of reservoir fracturing pressure and formation pressure is studied in order to monitor the pressure profile in the casing annulus. It has been found that managed pressure drilling as a fundamentally new primary penetration technology for the hydrodynamic conditions of the reservoir allows to perform drilling in the zones with almost any initial absorption rate. That means that we do not stop sinking by boring (i.e. circulation) and do not increase the equivalent pressure on the horizon that depends on the equivalent circulating density. The adjustment involves the approximation of the equivalent pressure on the horizon to the formation pressure. The technological process of managed pressure drilling with the use of the discussed equipment will enable better understanding of the efficiency of this drilling technology by the drilling personnel and contribute to its more conscious application by domestic companies.

Keywords: reservoir, primary penetration, drilling, formation pressure

For citation: Zaitsev V. I., Karpikov A. V. Well drilling with combined pressure control. *Nauki o Zemle i nedropol'zovanie = Earth sciences and subsoil use*. 2022;45(1):60-72. (In Russ.). <https://doi.org/10.21285/2686-9993-2022-45-1-60-72>.

Введение

Традиционная технология предлагает изменять при бурении нефтегазовых скважин значительную репрессию на забой и на стенки скважины. Это делается главным образом для предупреждения газонефтеводопроявлений и предохранения устойчивости стенок скважины. Тем не менее применение такой технологии приводит к снижению механической скорости проходки и ухудшению коллекторских свойств пластов.

Различного рода методы увеличения притока смеси на забой при вскрытии залежи, например гидроразрыв пласта, его кислотная обработка и другие, как правило, требуют значительных капитальных вложений и не оправдывают себя с технической и экономической точки зрения. Однако сегодня указанные традиционные способы решения проблемы можно заменить новым технологиями, не нарушающими фильтрационные свойства пласта [1–4].

К новым технологиям относятся технология бурения с регулируемым давлением (БРД, *англ.*: Managed Pressure Drilling, MPD) и ее разновидности. Главным назначением данной технологии является обеспечение поддержки необходимого минимального давления на забое. Вместе с тем требуются дальнейшие конструкционные разработки применяемой техники и совершенствование технологии бурения. Например, применяемые для реализации технологии расчетные методы определения забойного двигателя несовершенны по многим причинам, дросселирующие устройства в условиях абразивной среды бурового раствора обладают ограниченной работоспособностью. Недостаточно эффективно решен

вопрос о раннем обнаружении притока флюида из пласта в скважину. Требуется разработка автоматической системы, которая будет выдавать оперативное определение аномально высоких пластовых давлений посредством выявления по промывочной жидкости и шламу признаков, указывающих на приближение к высоконапорному скоплению флюидов, и давать количественную оценку ожидаемых пластовых давлений. Причем при интерпретации результатов исследований бурового раствора и шлама необходимо учитывать дальнейшее углубление скважины. Такое отслеживание аномально высоких пластовых давлений должно вестись сразу по нескольким признакам: содержанию в нем нефти и газа, форме шлама, изменению показателей свойств раствора и пр.

Международная ассоциация буровых подрядчиков (*англ.*: International Association of Drilling Contractors, IADC) определяет БРД как «адаптивный процесс бурения», используемый для точного контроля профиля давления в кольцевом пространстве по всему стволу скважины. Целью является установление пределов давления в забойном пространстве и управление гидравлической системой в затрубном пространстве. В настоящее время дальнейшее развитие технологии БРД при бурении глубоких эксплуатационных скважин и ее усовершенствование является актуальной задачей.

Материалы и методы исследования

В ходе исследования авторами анализировались опубликованные работы по осуществлению точного контроля профиля давления по



всему кольцевому пространству ствола скважины [5–8]. Изучалось специальное оборудование (зарубежное), а также программно-аппаратный комплекс для осуществления контроля профиля давления в затрубном пространстве. Рассматривались и анализировались более эффективные технологии первичного вскрытия трещиноватых и кавернозных анизотропно-проницаемых коллекторов с точки зрения добычи, что более соответствует геологическим особенностям строения и гидродинамики залежи [9–11]. С помощью технологии БРД исследовалось забойное давление с противодавлением блока дросселирования БРД. Определялись возможности новой технологии оперативно реагировать на изменение скважинных условий (поглощение, проявление) увеличением давления в затрубном пространстве за счет дросселирования потока промывочной жидкости или понижением его эквивалентной циркуляционной плотности (ЭЦП) за счет аэрации этой жидкости. В целях безопасности персонала и буровой установки анализировалось устройство, а также эксплуатация роторного устьевого герметизатора, обеспечивающего отвод ворот от пола буровой установки.

Результаты исследования

Для качественного вскрытия продуктивного горизонта нужно отойти от привычной практики использования утяжеленных буровых растворов. Требуется разработка новых технологий и технических решений, которые не ухудшат фильтрационные свойства пласта и снизят вероятность осложнений и аварий до минимума. Технология БРД, применяемая в системе «скважина – пласт» отвечает такого рода требованиям (рис. 1) [12, 13]. Использование специального оборудования и технологии позволяет достичь значительного снижения воздействия промывочной жидкости на продуктивный пласт (снижение скин-эффекта в призабойной зоне скважины), дает возможность проводить бурение трещиноватых коллекторов без необходимости кольматирования продуктивных зон, способствует увеличению коэффициента извлечения нефти и сроков продуктивности скважин. Также предлагаемая технология увеличивает механическую скорость бурения, способствует снижению

дифференциальных прихватов, повышает нормативный ресурс долот и может применяться при ведении добычи нефтегазовой смеси (последнее используется только при необходимости).

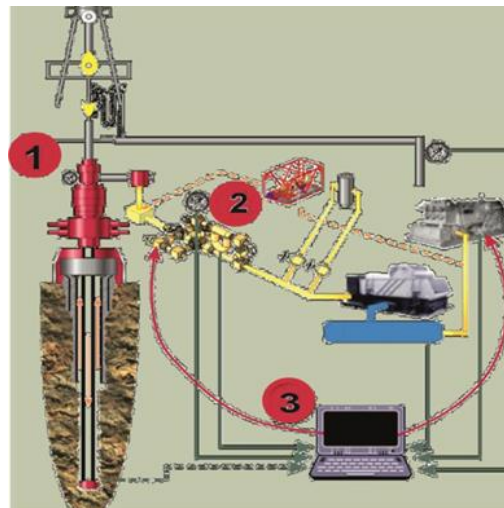


Рис. 1. Схема обвязки скважины:

- 1 – вращающийся превентор;
2 – штуцерный манифольд;
3 – автоматизированная система управления

Fig. 1. Well piping diagram:

- 1 – rotating preventer; 2 – choke manifold;
3 – automated control system

Рассмотрим оборудование, применяемое для бурения с комбинированным регулированием давления (рис. 2), предлагаемое компаниями АКРОС и M-I SWACO [14, 15]. Это установка управления противодавлением 12 (см. рис. 2, справа). Она предназначена для оперативного дистанционного управления превенторов с помощью гидроуправляемых задвижек. Установка управления противодавлением компании АКРОС с помощью закачки азота (англ.: Nitrogen Back Pressure) является уникальным решением для операций БРД, так как она устраняет зависимость от системы циркуляции бурового раствора поддержания нужного противодавления на поверхности во время отключения насосов.

Вместо того чтобы закачивать буровой раствор с помощью вспомогательного насоса или отдельного манифольда, установка позволяет закачивать небольшое количество азота с заданным давлением (определяется пользователем в соответствии с потребностями скважины) в трубопроводы БРД для поддержания соответствующего давления

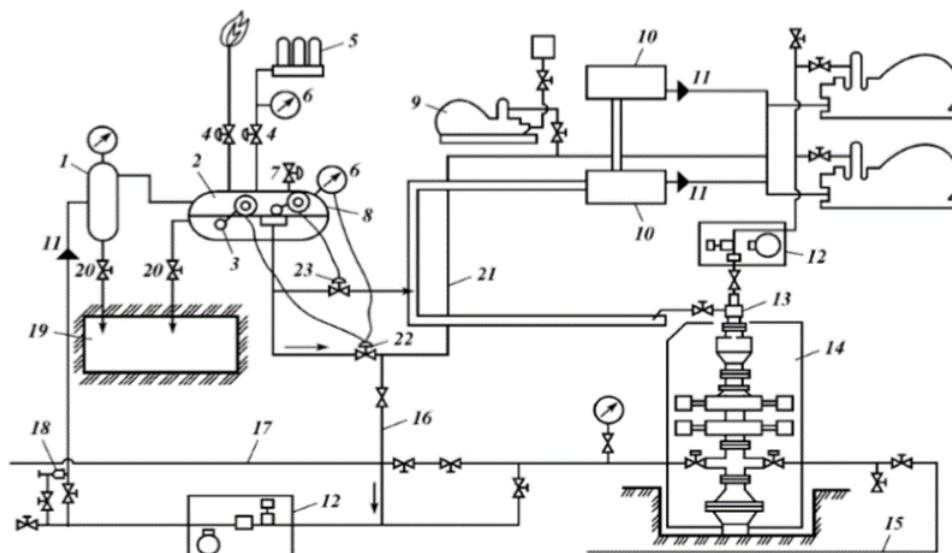


Рис. 2. Принципиальная схема замкнутой герметизированной системы циркуляции при бурении на депрессии (репрессии):

1 – сепаратор; 2, 8, 10 – емкость; 3, 4, 7, 22, 23 – система автоматики; 5 – баллон;
6, 12 – контроль; 11 – клапан; 13 – превентор; 14 – устье; 15, 17, 21 – трубопровод;
16 – долив; 18 – блок; 19 – амбар; 20 – задвижка

Fig. 2. Schematic diagram of a closed pressure-sealed circulation system under drilling on depression (overbalanced drilling)

1 – separator; 2, 8, 10 – tank; 3, 4, 7, 22, 23 – automation system; 5 – gas cartridge;
6, 12 – controller; 11 – valve; 13 – preventor; 14 – wellhead; 15, 17, 21 – pipeline;
16 – fill-up line; 18 – block; 19 – pit; 20 – gate valve

на поверхности в случае, если оно не может быть обеспечено дросселем или падает в статических условиях, например при выполнении трубных соединений.

Преимущества этой установки заключаются в отсутствии необходимости монтажа трубопроводов к закачивающему манифольду или емкости для бурового раствора. Установка интегрирована в систему БРД: система автоматически включает подачу азота при необходимости поддержания противодействия на поверхности.

Азотная компрессорная станция ТГА-10/250 Д95 активируется с помощью регулируемого клапана, который немедленно начинает закачивать азот с требуемым давлением без необходимости включения насоса или закрытия / открытия клапанов манифольда. Мобильная установка минимизирует затраты на транспортировку, монтаж и вывоз, а также влияние на окружающую среду, обеспечивая при этом максимальную эффективность и требуя минимального технического обслуживания.

Принципиальная схема закрытой циркуляции при комбинированном способе бурения

с регулированием давления (см. рис. 2) выглядит следующим образом. ЭЦП в скважине снижается путем подачи азота в линию нагнетания бурового раствора и в скважину. Далее газожидкостная смесь проходит через бурильную колонну, забойное и затрубное пространства и поступает в роторный устьевой герметизатор 14, подается в дроссельный блок 12 (см. рис. 2, внизу слева) и фильтруется в сепараторе 1.

Азот и пластовый газ в газосепараторе отделяются, и освобожденный раствор сливается на вибросита. Далее дегазированный раствор насосами закачивается в манифольд, где вновь происходит его насыщение азотом.

Штуцерный дроссельный манифольд представляет собой автоматизированный комплекс, включающий в себя такие агрегаты, как массовый расходомер, прецизионные кварцевые датчики давления, гидравлическая силовая установка (НПУ), «умный» блок управления (ICU) и система интерпретации данных в режиме реального времени. Манифольд оснащен двумя штуцерами, при этом один может использоваться постоянно, а второй – в аварийной ситуации, массовый расход



дометр установлен на манифольде после штуцеров по ходу движения флюида. Штуцерный манифольд является частью устьевого оборудования 14, предназначенного для успешного управления выбросом из скважины и выполнения технологии контроля давления на нефтяных и газовых скважинах в процессе бурения. В настоящее время устройство используется для выполнения техники баланса давления на новой буровой скважине, таким образом предотвращается загрязнение нефтяного слоя, увеличивается скорость бурения и контроль фонтана. Сбалансированное бурение достигается при минимальном давлении.

Гидравлическая силовая установка расположена на раме, что обеспечивает простоту ее транспортировки и подключения. Пневматический насос, скрытый внутри нее, использует систему технического воздуха буровой установки для нагнетания давления в гидравлическую систему аккумулятора, который передает гидравлическую энергию для перемещения штуцеров, а также позволяет в аварийном режиме, то есть при отказе пневматики и электрики, управлять штуцерами за счет аккумулярованного давления.

«Умный» блок управления является «мозгом» системы, куда направляются все собранные данные, и из него же осуществляется мониторинг и контроль всех операций. Все важнейшие средства управления, алгоритмы и устройства сбора данных установлены в блоке во избежание потенциальных проблем с коммуникацией и для повышения надежности системы. Система получения и контроля данных в реальном времени включает в себя интерфейс «пользователь – машина», в том числе панель оператора системы, панель бурильщика и дистанционную панель, если необходимо. Забойный клапан устанавливается как часть предыдущей обсадной колонны. Принцип действия клапана заключается в его открытии / закрытии с поверхности с помощью гидравлической панели, с которой давление передается к клапану посредством гидравлического кабеля.

Блок дроссельного манифольда компании M-I SWACO позволяет автоматически регулировать давление на стояке при любых усло-

виях, в том числе в случае регулировки пуска или остановки бурового насоса, свинчивания и развинчивания труб, автоматической регулировки отверстия дросселя.

Сепаратор предназначен для разделения на фазы газожидкостной смеси бурового раствора с пластовым флюидом, направления потока газовой фазы на рассеивание в атмосферу или на факельный стояк для сжигания, возврата бурового раствора в циркуляционную систему буровой установки в процессе ликвидации газонефтепроявления при строительстве глубоких скважин на нефть и газ. Двухфазный сепаратор (газоотделитель) компании АКРОС применяется во время бурения с контролем давления и бурения на малой скорости, когда требуется удаление газа из смеси бурового раствора и шлама. Четырехфазный горизонтальный сепаратор компании АКРОС разработан для глубокого бурения скважин с помощью азотированного бурового раствора. Он может разделять скважинную смесь на нефть, газ и воду или буровой раствор и шлам. Модуль сепаратора разработан в утепленном варианте для работы в зимних условиях. Преимуществами данных сепараторов являются автоматический контроль уровня жидкости в сепараторе, применение расходомеров на линиях сброса жидкости, клапанов автоматического контроля давления и визуальных уровнемеров. Это оборудование также имеет винтовой насос для сброса шлама.

Роторный устьевой герметизатор предназначен для автоматической герметизации устья скважины вокруг любой части бурильной колонны, в том числе ведущей, утяжеленных, насосно-компрессорных, а также замковых соединений бурильных труб, при вращении колонны, ее расхаживании, наращивании и выполнении спуско-подъемных операций. Роторный устьевой герметизатор компании АКРОС серии TITAN позволяет вести бурение с контролем давления на любой заданной глубине. Роторный устьевой герметизатор марки RCD3, разработанный фирмой M-I SWACO, имеет пассивные уплотнения, способствующие быстрому отводу из скважины материалов – газа, жидкости и выбуренного шлама – на сепарацию при бурении с равновесным



давлением или бурении на депрессии. Устройство RCD3 является компактным роторным устьевым герметизатором. В комплект устройства входит полный контур выравнивания давления и гидравлический клапан с дистанционным управлением, установленный на боковом выходном патрубке, что позволяет использовать давление на устье скважины для герметизации бурильной колонны во время всех бурильных операций со сбалансированным давлением.

Систему БРД компании АКРОС дополняют факельные вышки: она включают трапную установку и вышку при бурении скважины с большим газовым фактором, а также газовых скважин. Факельная вышка Beyond представляет собой интегрированное решение, включающее усовершенствованную систему зажигания и пламегаситель с байпасом для использования в аварийных ситуациях.

Эхомер «Геостар» – это комплекс программно-аппаратного обеспечения, который определяет уровень жидкости и величину давления в затрубном пространстве нефтяных скважин. Устанавливается на колонную головку.

Газовый карбонтракер измеряет скорость потока от 0,03 до 84 %. Точность измерений – ± 5 . Точность массового расхода углеводородной смеси – от 3 до 7 %.

При процедуре спуско-подъемных операций производят установку вязкоупругой пачки, имеющей гелеподобный состав на основе сшитого биополимера, с целью разделения растворов с различными плотностями для стабилизации скважины от газонефтеводопроявлений в статическом режиме при бурении на депрессии.

Важным фактором является то, что при использовании оборудования системы БРД устьевая и околоустьевая обвязка не заменяется, а лишь дополняется, при этом совместно используется и стандартное противовыбросовое оборудование, и все элементы стандартного комплекта буровой установки. Это не доставляет неудобств и повышает безопасность операций, поскольку обвязка дает больше возможностей для манипуляций при управлении скважиной. Роторный устьевой герметизатор не является противовыбросо-

вым оборудованием и устанавливается сверху блока противовыбросового оборудования. Роторный устьевой герметизатор обеспечивает герметизацию ствола скважины при нахождении в ней бурового инструмента, позволяет безопасно отводить поступающие из скважины газ, буровой раствор, пластовый флюид и выбуренную породу.

Авторами статьи изучены предлагаемые специалистами иркутского филиала «РН-Бурение» С. А. Сверкуновым и А. Г. Вахромеевым новые технологии вскрытия углеводородной залежи [16]. Рассмотрены горно-геологические условия применения данных технологий при бурении горизонтального ствола в коллекторах с аномально низкими и аномально высокими пластовыми давлениями.

В ряде работ вышеуказанных специалистов [17, 18] предполагается производить бурение при помощи регулируемого давления, применяя совмещенную технологию бурения на депрессии с технологией на репрессии, но делать это так, чтобы диапазон текущего забойного давления был очень близок к пластовому давлению в месте бурения. Получается, что, возможно, бурение будет происходить то с поглощением, то с проявлением, так как текущее пластовое давление тоже меняется. То есть предлагается бурить на давлении, максимально близком к «равновесию», где давление на забое примерно равно пластовому давлению (рис. 3). При этом будет наблюдаться приток пластового флюида в скважину во время депрессии. При помощи станции управления объем притока может быть уменьшен до незначительной величины. В случае, если даже при полном отключении воздуха интенсивность выброса увеличивается, включают в работу регулируемый штуцер, создают с его помощью на устье противодействие: уменьшают проходное сечение до тех пор, пока флюидопроявление стабилизируется на уровне избыточного давления на устье перед штуцером порядка 0,4–0,6 МПа. Иными словами, управление гидродинамическим давлением на забой осуществляют регулированием подачи воздуха в бурильную колонну и расхода газожидкостной смеси через штуцерную батарею на выходе из скважины. Таким образом, по сути будет происходить бурение

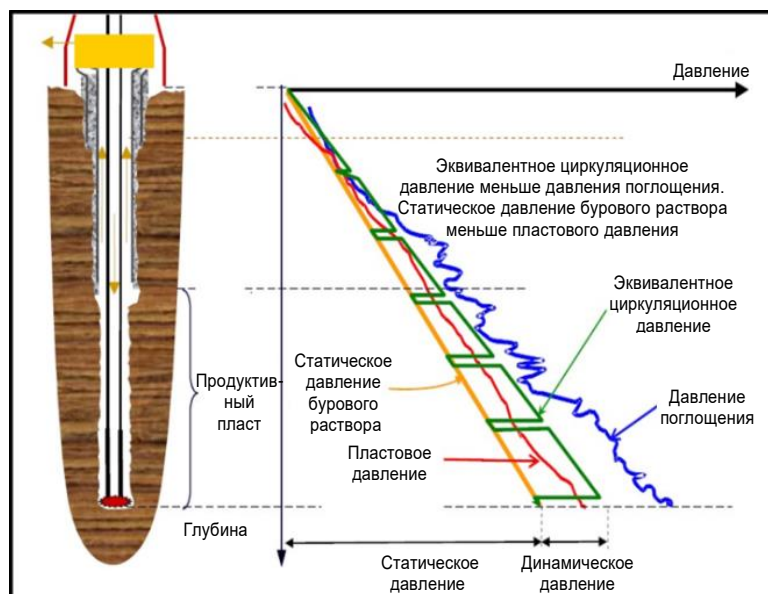


Рис. 3. Типовой график давлений при бурении с регулируемым давлением
Fig. 3. Typical pressure graph under controlled pressure drilling

с регулируемым газонефтеводопроявлением. Данную технологию можно назвать технологией с «комбинированным» регулируемым давлением.

Целесообразным представляется в начале процесса бурения использовать данные от бурения предыдущих скважины. Принять во внимание границы диапазонов давлений на депрессии и репрессии для добычного пласта, а также его температурные и барические характеристики. В процессе бурения ствола скважины (с замкнутым контуром) текущее забойное давление будет меняться с бурения на депрессию на бурение с репрессией при помощи блока автоматических дросселей. Регулирование давления дросселями происходит за счет изменения давления в колонном пространстве и определяется на забое обычными манометрами, а на устье образцовыми манометрами.

Предлагаемый допустимый диапазон регулируемого давления в забое горизонтального ствола скважины описывается известными неравенствами:

$$P_{\text{пл}} + \Delta_{\text{репр}} \geq P_{\text{заб}} \geq P_{\text{пл}} - \Delta_{\text{депр}}.$$

Величина давления дросселирования в режиме депрессии определяется как

$$P_{\text{пл}} - P_{\text{заб}} \geq P_{\text{дросс}} \geq (P_{\text{пл}} - \Delta_{\text{депр}}) - P_{\text{заб}};$$

в режиме репрессии – как

$$(P_{\text{пл}} + \Delta_{\text{депр}}) - P_{\text{заб}} \geq P_{\text{дросс}} \geq P_{\text{пл}} - P_{\text{заб}}.$$

Применение технологии БРД делает ненужными большие затраты на химические

реагенты и буровой раствор, поглощаемые при аномально низком пластовом давлении, и позволяет повысить уровень техники безопасности при строительстве скважины. Поступление газонефтяной смеси из пласта легко обнаруживается, а его объем значительно уменьшается под давлением. Блок дросселей быстро повышает забойное давление для ограничения дальнейшего притока.

Контур управления бурением скважины обеспечивает точный контроль забойного давления при прокачке притоков нефтегазоводяной смеси.

В контур входит следующее оборудование:

- блок автоматических дросселей;
- система измерения давления и каротажа в процессе бурения;
- система измерения давления промывочного раствора, его объемов и расхода при циркуляции.

Рассматриваемое оборудование и технология БРД успешно применяются в некоторых странах зарубежья при бурении зон с аномально высоким пластовым давлением. Используются также буровые растворы малой плотности, но с учетом возможности создания противодействия на устье скважины. Все большее применение при бурении находят тяжелые буровые растворы без твердой фазы, как правило это рассолы на основе солей брома – их часто используют нефтяные



компании мира. Используются ими и другие технологии, в том числе на депрессии.

Возможности метода БРД по контролю и снижению давления в скважине обеспечивают улучшение и дополнение традиционных методов управления скважиной. В качестве дополнительного уровня управления скважиной их можно использовать на ранних стадиях, что обеспечит высокую эффективность и минимальные нарушения процесса, а также более низкие по сравнению с традиционными технологиями затраты. Метод БРД также предоставляет возможность проведения динамических испытаний на герметичность и испытаний на гидроразрыв для определения предельных значений порового давления / градиента гидроразрыва пласта. Благодаря этому инженеры в режиме реального времени получают точные данные с глубины скважины, что позволяет им точно определить фактическое окно бурения и перемещать его, управляя забойным давлением.

При правильном использовании и управлении метод БРД может помочь значительно снизить затраты и степень неопределенности, а также способствует постепенному изменению экономических показателей бурения. Универсальность, точность и гибкость настройки значений давления в скважине при использовании БРД изменили сам принцип традиционного управления скважиной. Данный метод является улучшенной формой управления скважиной, в которой сочетаются протоколы как традиционного бурения, так и бурения на депрессии (рис. 4) [19–21].

Рассматриваемая технология считается наиболее совершенной на данный период времени, так при помощи нее можно контролировать давление по всей глубине скважины, регулируя ЭЦП раствора. Герметичность циркуляционной системы «насос – пласт» дает возможность увеличивать давление в затрубном пространстве за счет применения системы дросселей или, наоборот, уменьшать это давление за счет азотирования бурового раствора. При возможных осложнениях, например при проявлении или поглощении, применяя базовое оборудование, инженер БРД может оперативно вмешиваться и изменять условия бурения в скважине, в первую очередь через автоматическую систему дросселей.

Рассматриваемая технология БРД, как и соответствующее ей оборудование, может применяться для всех месторождений углеводородов с учетом доработки, если это необходимо при апробации конкретной скважины [22–25]. Так, при бурении на депрессии очень опасным фактором является постоянный приток в скважину растворенного газа и пластовой нефти. Устьевое давление может при этом увеличиваться до 4–8 МПа, а при остановках бурения до 20 МПа, что небезопасно и может привести к аварии. Дебит скважины при притоке нефти может достигать 200–600 м³/м³. В некоторых карбонатных коллекторах при бурении на депрессии при входе на горизонтальный участок дебит газа достигал 30–38 тыс. м³/сут., поглощение – 4–6 м³/ч, а поступление газа – 105 тыс. м³/сут.

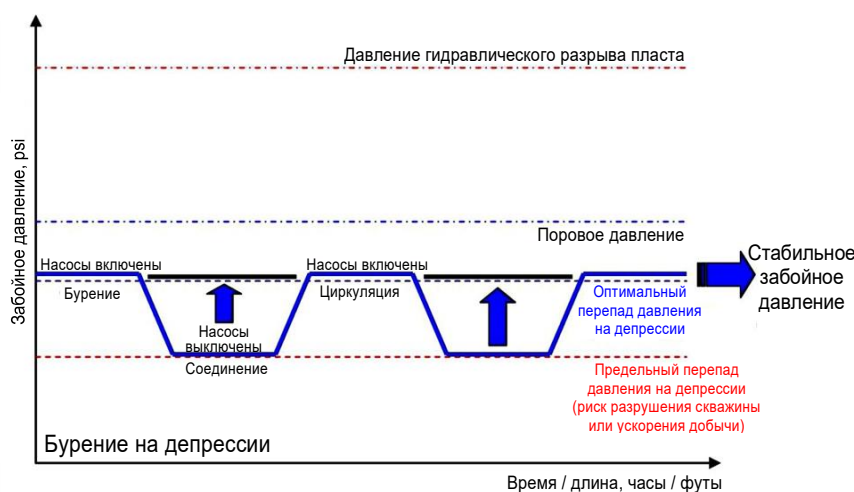


Рис. 4. Типовая гидравлическая программа бурения на депрессии
Fig. 4. Typical hydraulic drilling program on the depression



В качестве наглядности применения БРД на Юрубчено-Тохомском месторождении приведем пример бурения горизонтальной скважины длиной 897 м. Принимая во внимание уже установленное эквивалентное давление пласта, плотность бурового раствора была определена в пределах $0,94 \text{ г/см}^3$, подача азота из установки производилась в диапазоне $14\text{--}18 \text{ м}^3/\text{мин}$. В результате ЭЦП достигла $0,95 \text{ г/см}^3$. Тем не менее из-за полученного обильного поглощения потребовалось снизить плотность бурового раствора до $0,86 \text{ г/см}^3$ и продолжить бурение скважины с проявлением пластового газа до $2\text{--}3 \text{ м}^3/\text{ч}$, что является приемлемым. В результате были подобраны окончательные параметры процесса бурения при ЭЦП в пределах $0,78\text{--}0,82 \text{ г/см}^3$ – производительность насосов 11 л/с и подача азота около $20 \text{ м}^3/\text{мин}$. При помощи замеров было установлено, что противодействие при циркуляции достигало $0,2 \text{ МПа}$, а при наращивании колонны – $2,4 \text{ МПа}$. В качестве связи системы телеметрии SlimPulse с дневной поверхностью использовался гидравлический канал связи. В процессе бурения для определения и регулирования ЭЦП применялся газовый расходомер. С его помощью в режиме реального времени определялась интенсивность проявления пластового газа, после чего полученные данные использовались для моделирования гидродинамических условий в скважине и определялась необходимая ЭЦП. Во время спуско-подъемных операций для противодействия на пласт в скважину сбрасывалась вязкоупругая пачка. Она замещала применяемый буровой раствор на утяжеленный плотностью $1,05 \text{ г/см}^3$.

Важно заметить, что БРД не заменяет традиционные методы строительства скважины, а только дополняет их. БРД обеспечивает безопасность бурения скважины и в конечном счете является экономически выгодным. Особенно это заметно в морских арктических условиях с автономным характером бурения, где требуется специализированное оборудование, а также регламенты и квалифицированный персонал с навыками работы именно в подобных сложных условиях.

Заключение

На основе анализа приведенных данных можно сделать вывод о необходимости вне-

дения технологии первичного вскрытия с дальнейшим горизонтальным бурением под контролем регулируемого давления как совмещенной версии репрессии и депрессии, то есть бурения, близкого к равновесию.

Относительно большая затратность этой технологии на этапе внедрения будет закономерно снижаться при серийном ее применении в эксплуатационном горизонтальном бурении. Как показывает практика, газожидкостная смесь с применением азота может применяться для циркуляции раствора и достижения сбалансированного давления, когда давление на забое скважины находится почти на уровне пластового давления. Основной особенностью системы БРД является ее полная герметичность на участке «буровой насос – газосепаратор», что позволяет управлять всеми процессами на забое скважины во время бурения и существенно минимизировать риск возникновения газонефтеводопроявлений.

Применение систем бурения скважин с комбинированным управляемым давлением позволяет снизить все риски при бурении, повысить его эффективность, а также бурить ранее не подлежащие разбуриванию скважины. БРД позволяет:

- минимизировать загрязнения буровым раствором продуктивного пласта;
- производить бурение пластов с аномально низким пластовым давлением без поглощения бурового раствора;
- увеличить механическую скорость в связи с отсутствием поглощений;
- повысить безопасность работ в сложных горно-геологических условиях;
- управлять профилем давления в скважине на любой глубине;
- определять фактические градиенты давления в динамике;
- оперативно повышать давление на забое без необходимости замещения раствора при проявлениях и нестабильности стенок скважины;
- контролировать основные параметры системы: противодействие, плотность флюида, его реологические свойства, уровень в затрубном пространстве, потери циркуляционного давления на трение в затрубном пространстве.

К недостаткам БРД следует отнести сложность технологического процесса, необходи-



мость высокого уровня подготовки персонала и повышенный риск получения выброса флюида.

На сегодняшний день БРД получает распространение в компаниях России. Опытно-промышленные работы с использованием БРД проводятся в компаниях ИГС-НЭУ, «Газпром» и других. Из представленного выше материала видно, что бурение с комбинирован-

ными регулированием давления имеет огромные перспективы развития и применения как на давно разрабатываемых месторождениях (в условиях проработанных пластовых давлений), так и на новых разведанных месторождениях для минимизации рисков возникновения газонефтеводопроявлений и других осложнений.

Список источников

1. Гасумов Р. А. Риски при бурении поисково-разведочных скважин в осложненных горно-геологических условиях // Проблемы экономики и управления нефтегазовым комплексом. 2014. № 9. С. 26–30.
2. Сверкунов С. А. Применение технологии бурения с регулируемым давлением в условиях Восточной Сибири // Известия Сибирского отделения секции наук о Земле Российской академии естественных наук. Геология, поиски и разведка рудных месторождений. 2012. № 2. С. 122–125.
3. Вахромеев А. Г., Иванишин В. М., Сверкунов С. А., Поляков В. Н., Розяпов Р. К. Глубокая скважина как стенд гидравлических «on-line» исследований напряженного состояния горного массива флюидонасыщенных трещиноватых коллекторов // Геодинамика и тектонофизика. 2019. Т. 10. № 3. С. 761–778. <https://doi.org/10.5800/GT-2019-10-3-0440>.
4. Вахромеев А. Г., Иванишин В. М., Акчурин Р. Х., Сверкунов С. А. Первые выводы по результатам внедрения технологии бурения с комбинированным регулируемым давлением для сложных горно-геологических условий Восточной Сибири // Строительство нефтяных и газовых скважин на суше и море. 2019. № 9. С. 5–12. <https://doi.org/10.30713/0130-3872-2019-9-5-12>.
5. Гасумов Р. А. Копченков В. Т. Лукьянов В. Т., Фёдорова Н. Г., Овчаров С. Н. Особенности строительства глубоких скважин в осложненных горно-геологических условиях Предкавказья // Наука. Инновации. Технологии. 2017. № 1. С. 123–140.
6. Сираев Р. У., Сверкунов С. А., Данилова Е. М., Сотников А. К., Вахромеев А. Г. Анализ горно-геологических условий бурения геологоразведочных скважин на нефть и газ на Даниловской площади, Непский свод // Вестник Иркутского государственного технического университета. 2013. № 12. С. 131–136.
7. Economides M. J., Watters L. T., Dunn-Norman S. Petroleum well construction. New York: Wiley, 1998. 640 p.
8. Гасумов Р. А., Керимов И. А., Харченко В. М. Влияние геологических факторов на коллекторские свойства продуктивных пластов с трещиноватыми глинистыми коллекторами при их вскрытии бурением // Строительство нефтяных и газовых скважин на суше и на море. 2018. № 7. С. 28–31. <https://doi.org/10.30713/0130-3872-2018-7-28-31>.
9. Fertl W. H., Chapman R. E., Hotz R. F. Studies in abnormal pressures. Oxford: Elsevier, 1994. 454 p.
10. Белонин М. Д., Славин В. И., Чилингар Д. В. Аномально высокие пластовые давления. Происхождение, прогноз, проблемы освоения залежей углеводородов: монография. СПб.: Недра, 2005. 324 с.
11. Rabia H. Oilwell drilling engineering: principles and practice. London: Graham & Trotman, 1985. 322 p.
12. Вахромеев А. Г., Сверкунов С. А., Мартынов Н. Н. Бурение на депрессии в сложных горно-геологических условиях Восточной Сибири // Геонаука-2016: материалы Всероссийской научно-технической конференции. Вып. 16. Иркутск: Изд-во ИрГТУ, 2016. С. 30–34.
13. Вахромеев А. Г., Сверкунов С. А., Иванишин В. М., Розяпов Р. К., Данилова Е. М. Геодинамические аспекты исследования сложных горно-геологических условий бурения древнейших карбонатных резервуаров нефти и газа рифея: обзор проблемы на примере месторождений Байkitской нефтегазоносной области // Геодинамика и тектонофизика. 2017. Т. 8. № 4. С. 903–921. <https://doi.org/10.5800/GT-2017-8-4-0323>.
14. Сверкунов С. А., Вахромеев А. Г., Сираев Р. У., Данилова Е. М. Бурение скважин с горизонтальным окончанием в сложных горно-геологических условиях. Иркутск: Изд-во ИРНТУ, 2016. 201 с.
15. Гиниатуллин Р. Р., Кириев В. В., Крепостников Д. Д., Чернокалов К. А., Загивный Ф. А., Доброхлеб П. Ю. [и др.]. Эффективный способ бурения скважин в условиях катастрофических поглощений в трещиноватых коллекторах Юрубчено-Тохомского месторождения // Нефтяное хозяйство. 2017. № 11. С. 40–43. <https://doi.org/10.24887/0028-2448-2017-11-40-43>.
16. Пат. № 2598268, Российская Федерация, МПК E21B 21/08. Способ первичного вскрытия сложного кавернозно-трещинного карбонатного нефтегазонасыщенного пласта горизонтальным стволом большой протяженности / С. А. Сверкунов, А. Г. Вахромеев, Р. У. Сираев. Заявл. 13.10.2015; опубл. 20.09.2016. Бюл. № 26.
17. Robinson L. Optimising bit hydraulics increases penetration rate // World Oil. 1982. July. P. 24–26.
18. Вахромеев А. Г., Розяпов Р. К., Постникова О. В., Кутукова Н. М., Сверкунов С. А., Сираев Р. У. Литологические и гидродинамические факторы, определяющие условия первичного вскрытия горизонтальным бурением и освоение продуктивных интервалов рифейского природного резервуара Юрубчено-Тохомского НГКМ // Геология и минерально-сырьевые



ресурсы Сибири. 2015. № 3. С. 67–81.

19. Auzina L. I., Parshin A. V. System-intergrated GIS-based approach to estimating hydrogeological condition of oil-and gas fields in Eastern Siberia // IOP Conference. Series: Earth and Environmental Science. 2016. Vol. 33. P. 012060. <https://doi.org/10.1088/1755-1315/33/1/012060>.

20. Ofei T. N., Irawan S., Pao W. CFD method for predicting annular pressure losses and cuttings concentration in eccentric horizontal wells // Journal of Petroleum Engineering. 2014. P. 486423. <https://doi.org/10.1155/2014/486423>.

21. Поляков В. Н., Ишкаев Р. К., Лукманов Р. Р. Технология закачивания нефтяных и газовых скважин. Уфа: ТАУ, 1999. 404 с.

22. Van Golf-Racht T. D. Fundamentals of fractured reservoir engineering. Amsterdam: Elsevier, 1986. 732 p.

23. Рябчук В. А., Сердобинцев Ю. П., Шмелев В. А.,

Кривошеева Н. Н. Анализ применения технологий бурения с управляемым давлением на забое при проводке ствола скважины в карбонатных отложениях // Молодой ученый. 2019. № 22. С.138–139.

24. Пат. № 2617820, Российская Федерация, МПК E21B 43/16. Способ определения максимальной длины горизонтального ствола в условиях каверново-трещинного карбонатного нефтегазонасыщенного пласта с аномально низким пластовым давлением / С. А. Сверкунов, А. Г. Вахромеев, Р. У. Сираев. Заявл. 11.09.2015; опубл. 16.03.2017. Бюл. № 12.

25. Пат. № 2657052, Российская Федерация, МПК E21B 43/25, E21B 43/02. Способ испытания и освоения флюидонасыщенного пласта-коллектора трещинного типа / В. М. Иваншин, А. Г. Вахромеев, С. А. Сверкунов, Р. У. Сираев, И. В. Горлов, Ю. В. Ланкин. Заявл. 21.04.2017; опубл. 08.06.2018.

References

1. Gasumov R. A. Exploratory wells drilling risks in complicated geological conditions. *Problemy ekonomiki i upravleniya neftegazovym kompleksom = Problems of economics and management of oil and gas complex*. 2014;9:26-30. (In Russ.).

2. Sverkunov S. A. Managed pressure drilling technology under conditions of Eastern Siberia. *Izvestiya Sibirskogo otdeleniya seksii nauk o Zemle Rossiiskoi akademii estestvennykh nauk. Geologiya, poiski i razvedka rudnykh mestorozhdenii = 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*. 2012;2:122-125. (In Russ.).

3. Vakhromeev A. G., Ivanishin V. M., Sverkunov S. A., Polyakov V. N., Razyapov R. K. Deep well as a facility for on-line hydraulic studies of the stress state of the rock mass in fluid-saturated fractured reservoirs. *Geodinamika i tektonofizika = Geodynamics & Tectonophysics*. 2019;10(3):761-778. (In Russ.). <https://doi.org/10.5800/GT-2019-10-3-0440>.

4. Vakhromeev A. G., Ivanishin V. M., Akchurin R. Kh., Sverkunov S. A. The first conclusions made by the results obtained after the implementation of the drilling technology with combined regulated pressure for complex geological conditions of the Eastern Siberia. *Stroitel'stvo neftyanykh i gazovykh skvazhin na sushe i more*. 2019;9:5-12. (In Russ.). <https://doi.org/10.30713/0130-3872-2019-9-5-12>.

5. Gasumov R. A., Kopchenkov V. G., Luk'yanov V. T., Fodorova N. G., Ovcharov S. N. Peculiarities of deep wells construction in complicated mining and geological conditions of the Ciscaucasia. *Nauka. Innovatsii. Tekhnologii*. 2017;1:123-140. (In Russ.).

6. Siraev R. U., Sverkunov S. A., Danilova E. M., Sotnikov A. K., Vakhromeev A. G. Analysis of mining and geological conditions of exploratory well drilling for oil and gas in Danilovskaya area, Nepsky arch. *Vestnik Irkutskogo gosudarstvennogo tekhnicheskogo universiteta = Proceedings of Irkutsk State Technical University*. 2013;12:131-136. (In Russ.).

7. Economides M. J., Watters L. T., Dunn-Norman S. *Petroleum well construction*. New York: Wiley; 1998. 640 p.

8. Gasumov R. A., Kerimov I. A., Kharchenko V. M. The influence of geological factors on the collecting properties of productive formations composed of fractured clay reservoirs while their drilling-in. *Stroitel'stvo neftyanykh i gazovykh skvazhin na sushe i more*. 2018;7:28-31. (In Russ.). <https://doi.org/10.30713/0130-3872-2018-7-28-31>.

9. Fertl W. H., Chapman R. E., Hotz R. F. *Studies in abnormal pressures*. Oxford: Elsevier; 1994. 454 p.

10. Belonin M. D., Slavin V. I., Chilingar D. V. *Abnormally high reservoir pressures. The origin, forecast and problems in hydrocarbon deposit development*. Saint Petersburg: Nedra; 2005. 324 p. (In Russ.).

11. Rabia H. *Oilwell drilling engineering: principles and practice*. London: Graham & Trotman; 1985. 322 p.

12. Vakhromeev A. G., Sverkunov S. A., Martynov N. N. Underbalanced drilling in complex mining and geological conditions of eastern Siberia. *Geonauka-2016: materialy Vserossiiskoi nauchno-tekhnicheskoi konferentsii = Geo-science-2016: materials of All-Russian scientific and technical conference*. Irkutsk: Irkutsk State Technical University; 2016, vol. 16, p. 30–34. (In Russ.).

13. Vakhromeev A. G., Sverkunov S. A., Ivanishin V. M., Razyapov R. K., Danilova E. V. Geodynamic aspects in the study of complex mining and geological conditions for drilling into oil-and-gas reservoirs in the Riphean carbonate rocks: an overview of the problem as exemplified by the deposits in the Baikite petroliferous district. *Geodinamika i tektonofizika = Geodynamics & Tectonophysics*. 2017;8(4):903-921. (In Russ.). <https://doi.org/10.5800/GT-2017-8-4-0323>.

14. Sverkunov S. A., Vakhromeev A. G., Siraev R. U., Danilova E. M. *Drilling of horizontal-end wells in complex mining and geological conditions*. Irkutsk: Irkutsk National Research Technical University; 2016. 201 p. (In Russ.).

15. Giniatullin R. R., Kireev V. V., Krepostnov D. D., Chernokalov K. A., Zagrivnyi F. A., Dobrokhleb P. Yu., et al. Effective solution for wells drilling in conditions of catastrophic mud losses in fractured reservoirs of the Yurubcheno-Tokhomskoye field. *Neftyanoe khozyaistvo*. 2017; 11:40-43. (In Russ.). <https://doi.org/10.24887/0028-2448-2017-11-40-43>.



16. Sverkunov S. A., Vakhromeev A. G., Siraev R. U. *Method for initial exposing of complex cavernous-fracture of carbonate oil and gas saturated formation with horizontal shaft of long length*. Patent RF, no. 2598268; 2016. (In Russ.).
17. Robinson L. Optimising bit hydraulics increases penetration rate. *World Oil*. 1982;July:24-26.
18. Vakhromeev A. G., Razyapov R. K., Postnikova O. V., Kutukova N. M., Sverkunov S. A., Siraev R. U. Lithological and hydrodynamic factors controlling conditions of primary horizontal drilling and development of producing intervals of the Riphean natural reservoir in the Yurubcheno-Tokhonskoye oil-gas-condensate field. *Geologiya i mineral'no-syr'evye resursy Sibiri = Geology and Mineral Resources of Siberia*. 2015;3:67-81. (In Russ.).
19. Auzina L. I., Parshin A. V. System-intergrated GIS-based approach to estimating hydrogeological condition of oil-and gas fields in Eastern Siberia. *IOP Conference. Series: Earth and Environmental Science*. 2016;33:012060. <https://doi.org/10.1088/1755-1315/33/1/012060>.
20. Ofei T. N., Irawan S., Pao W. CFD method for predicting annular pressure losses and cuttings concentration in eccentric horizontal wells. *Journal of Petroleum Engineering*. 2014;486423. <https://doi.org/10.1155/2014/486423>.
21. Polyakov V. N., Ishkaev R. K., Lukmanov R. R. *Oil and gas well injection technology*. Ufa: TAU; 1999. 404 p. (In Russ.).
22. Van Golf-Racht T. D. *Fundamentals of fractured reservoir engineering*. Amsterdam: Elsevier; 1986. 732 p.
23. Ryabchuk V. A., Serdobintsev Yu. P., Shmelev V. A., Krivosheeva N. N. Analysis of the application of controlled pressure drilling technologies at the bottomhole when drilling a wellbore in carbonate deposits. *Molodoi uchenyi*. 2019;22:138-139. (In Russ.).
24. Sverkunov S. A., Vakhromeev A. G., Siraev R. U. *Method for determining the maximum length of a horizontal wellbore in a cavernous-fractured carbonate oil- and gas-saturated formation with abnormally low formation pressure*. Patent RF, no. 2617820; 2017. (In Russ.).
25. Ivanishin V. M., Vakhromeev A. G., Sverkunov S. A., Siraev R. U., Gorlov I. V., Lankin Y. K. *Method of testing and conversion of fluid-saturated fracture reservoir bed (variants)*. Patent RF, no. 2657052; 2018. (In Russ.).

Информация об авторах / Information about the authors



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



Карпиков Александр Владимирович,
кандидат технических наук, доцент,
доцент кафедры нефтегазового дела,
Институт недропользования,
Иркутский национальный исследовательский технический университет,
г. Иркутск, Россия,
karpikov@istu.edu.
Alexander V. Karpikov,
Cand. Sci. (Eng.), Associate Professor,
Associate Professor of the Oil and Gas Department,
Institute of Subsoil Use,
Irkutsk National Research Technical University,
Irkutsk, Russia,
karpikov@istu.edu.

Вклад авторов / Contribution of the authors

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

**Конфликт интересов / Conflict of interests**

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

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

Информация о статье / Information about the article

Статья поступила в редакцию 14.12.2021; одобрена после рецензирования 26.01.2022; принята к публикации 28.02.2022.

The article was submitted 14.12.2021; approved after reviewing 26.01.2022; accepted for publication 28.02.2022.



Научная статья

УДК 622.01

<https://doi.org/10.21285/2686-9993-2022-45-1-73-79>



Исследование на трехмерной модели проявления бокового давления во вскрышных породах сооружаемого в ущелье отвала

Ануш Ашотовна Казарян^а

^аЛернaметалургияи институт, ГК «Валлекс», г. Ереван, Республика Армения

Резюме. На современном этапе отработки нагорных карьеров формирование многоярусных отвалов вскрышных пород в сложных условиях гористой местности и ограниченности земельных ресурсов остается проблемной задачей. Анализ показал, что на практике проектирования многоярусных отвалов в ущельях соответствующим образом не рассмотрены вопросы, связанные с установлением распределения напряжений в теле отвала в зависимости от величины двугранного угла, образованного откосами боковых граней ущелья. Дело в том, что в процессе отсыпки вскрышных пород на центральную осевую плоскость формируемого в ущелье отвала со стороны наклонных поверхностей ущелья передаются силы напряжений, при этом наклонное составляющее напряжений обусловлено массой отсыпаемых на наклонные боковые поверхности ущелья вскрышных пород. Эти боковые напряжения направлены под углом к сдвигающим усилиям, действующим в отвале, и в процессе формирования отвала играют положительную роль в ускорении процесса консолидации горной массы в зажатой среде. Снижение сдвигающих усилий в отвале приводит к увеличению его устойчивости, а также к определению в связи с этим рациональных объемов укладываемых в нем вскрышных пород и главных параметров многоярусного отвала. Необходимо отметить, что имеются значительные трудности в выявлении и объективной оценке характера возникновения и распределения сил напряжений в сооружаемом в ущелье отвале графоаналитическими методами. В ходе представленного исследования автором была предпринята попытка выявления и регистрации в теле формируемого в ущелье многоярусного отвала вскрышных пород сил напряжений при помощи методов физического моделирования. Для этого разработан трехмерный модельный стенд многоярусного отвала. Данный стенд позволяет методом физического моделирования решать объемную задачу и в зависимости от углов откоса боковых поверхностей ущелья выявлять закономерности изменения напряжений в центральной осевой плоскости модели отвала.

Ключевые слова: трехмерный модельный стенд, ущелье, эквивалентный материал, двугранный угол, центральная осевая плоскость, датчики напряжения

Для цитирования: Казарян А. А. Исследование на трехмерной модели проявления бокового давления во вскрышных породах сооружаемого в ущелье отвала // Науки о Земле и недропользование. 2022. Т. 45. № 1. С. 73–79. <https://doi.org/10.21285/2686-9993-2022-45-1-73-79>.

Original article

A three-dimensional model study of lateral pressure manifestation in gorge dump overburden

Anush A. Khazaryan^a

^aLernametalurgiai Institute CJSC, Vallex Group, Yerevan, Republic of Armenia

Abstract. Today the development of upland quarries with the formation of multi-tiered dumps of overburden rock mass in complex conditions of mountainous terrain and limited land resources still remains a problem. The conducted analysis has shown that the practice of designing of multi-tiered dumps in gorges lacks detailed consideration of the issues determining the stress distribution in the dump body depending on the dihedral angle formed by the slopes of the side faces of the gorge. The point is that the process of overburden dumping is accompanied with the transmission of stress forces to the central axial plane of the dump body formed in the gorge from the side of the gorge inclined surfaces. At the same time, the inclined component of stresses is due to the mass of overburden rocks dumped onto the inclined side surfaces of the gorge. Being directed at an angle to the shear forces acting in the dump, these lateral stresses play a positive role in the acceleration of rock mass consolidation in the clamped environment during the overburden dump formation. The decrease in dump shear forces leads to the increase in dump stability. It also allows to determine the rational volumes of overburden to be laid as well as the main parameters of a multi-tiered dump. It should be noted that there are significant difficulties in identifying and objective assessing the nature of occurrence and distribution of stress forces in the dump being

© Казарян А. А., 2022



constructed in the gorge using graphic-analytical methods. In the course of the presented study, the author made an attempt to identify and register stress forces in the body of a multi-tiered overburden dump formed in the gorge using physical modeling methods. For this purpose, a three-dimensional model test bench of a multi-tiered dump has been developed. This test bench allows to solve a three-dimensional problem using the method of physical modeling and, identify the stress variation patterns in the central axial plane of the dump model depending on the inclination angles of the side surfaces of the gorge.

Keywords: three-dimensional model test bench, gorge, equivalent material, dihedral angle, central axial plane, stress sensors

For citation: Khazaryan A. A. A three-dimensional model study of lateral pressure manifestation in gorge dump overburden. *Nauki o Zemle i nedropol'zovanie = Earth sciences and subsoil use*. 2022;45(1):73-79. (In Russ.). <https://doi.org/10.21285/2686-9993-2022-45-1-73-79>.

Введение

Анализ исследований предшественников показал, что в настоящее время недостаточным образом исследован ряд вопросов, связанных с обоснованием главных параметров многоярусных отвалов, сооружаемых в сложных рельефных условиях. В действующих методических указаниях для расчета параметров многоярусных отвалов, сооружаемых в ущельях, рекомендуется использовать те же методы, что и для расчета параметров отвалов, размещенных на ровных площадках или на наклонном основании¹ [1, 2]. Тем не менее в известных исследованиях приводится информация о том, что характер распределения сил в отвале, сооружаемом в ущелье, отличается от аналогичного показателя для отвалов, сформированных на ровных или слабонаклонных площадках. В них также показано, что отвальная масса вскрышных пород в ущельях находится в «зажатой среде», где значительная роль отводится влиянию на массу отвальных пород двугранного угла, образованного боковыми плоскостями ущелья [3–5]. В связи с этим при обосновании и расчете коэффициента устойчивости сооружаемого в ущелье многоярусного отвала помимо определения действующих в теле отвала удерживающих и сдвигающих сил необходимо учитывать и реакции сил, передаваемых боковыми плоскостями ущелья на центральную осевую плоскость отвала.

Материалы и методы исследования

В ходе данной работы для выявления и определения характера распределения сил

в отвале вскрышных пород в ущелье был использован метод физического моделирования. Автором разработана трехмерная модель конструкции поворотного модельного стенда, на которую в 2019 г. получен патент Республики Армения № 3350А [6]. Разработка модельного стенда и все сопутствующие исследования были выполнены в ЗАО «Лернаметалургияи институт» ГК «Валлекс».

Результаты исследования и их обсуждение

Из технической литературы известно, что моделирование геотехнического сооружения из эквивалентных материалов выполняется на плоских стендах двумя способами: на вращающихся и стационарных стендах [7–10]. Однако при помощи этих конструкций стендов физического моделирования отвалов ввиду нейтрализации в них воздействия боковых сил невозможно выявить силы напряжений, передаваемых на массу отвальных пород со стороны боковых поверхностей ущелья [11, 12]. Общий вид модельного стенда такого рода показан на рис. 1 [6].

Разработанный автором данной статьи трехмерный стенд физического моделирования в отличие от вышеупомянутых стендов имеет боковые грани, шарнирно связанные с каркасом основания и обладающие возможностью наклона в направлении основания. Установленные датчики регистрации напряжений расположены в центральной осевой плоскости массы эквивалентного материала. Боковые стенки (грани) соединены с основанием корпуса стенда горизонтальными шарнирами, а сдвоенные датчики напряжений

¹ Методические указания по определению углов наклона бортов, откосов уступов и отвалов строящихся и эксплуатируемых карьеров. Л.: Изд-во ВНИМИ, 1972. 165 с.



размещены в эквивалентном материале по всей высоте центральной осевой плоскости. При этом угол, образованный между парными датчиками, вдвое больше угла внутреннего трения, образованного между центральной вертикальной плоскостью модели и эквивалентного материала.

На рис. 2 показана центральная вертикальная плоскость разработанной модели с указанием датчиков напряжения в осевой плоскости модели. Угол установки датчиков

регистрации напряжений в эквивалентном материале центральной вертикальной плоскости β и равнодействующее давление E в модельном стенде также представлены на рис. 2 [13].

Угол β можно определить согласно рис. 2 (узел А), на котором из прямоугольного треугольника abc следует, что:

$$\delta + 90^\circ + \alpha = 180^\circ;$$

$$\alpha = 90^\circ - \delta;$$

$$\alpha + \beta + 90^\circ = 180^\circ;$$

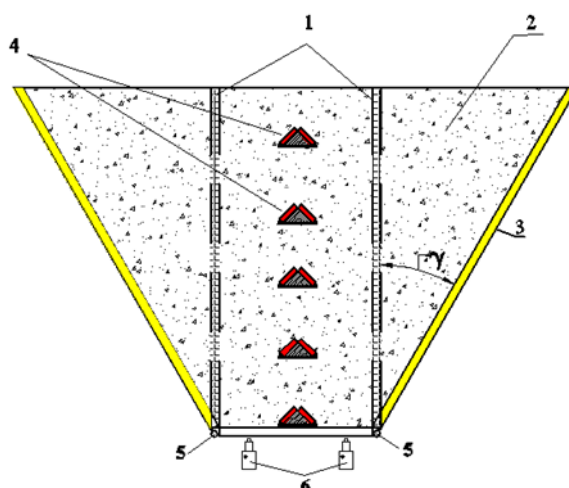


Рис. 1. Установка датчиков напряжения в центральной вертикальной плоскости эквивалентного материала в модельном стенде:

1 – каркас модельного стенда; 2 – эквивалентный материал; 3 – боковые стенки; 4 – датчики; 5 – горизонтальные шарниры крепления боковых граней к основанию модели; 6 – домкраты

Fig. 1. Installation of stress sensors in the central vertical plane of the equivalent material in the model test bench:

1 – model test bench frame; 2 – equivalent material; 3 – side walls; 4 – sensors; 5 – horizontal hinges for side face fastening to the model base; 6 – jacks

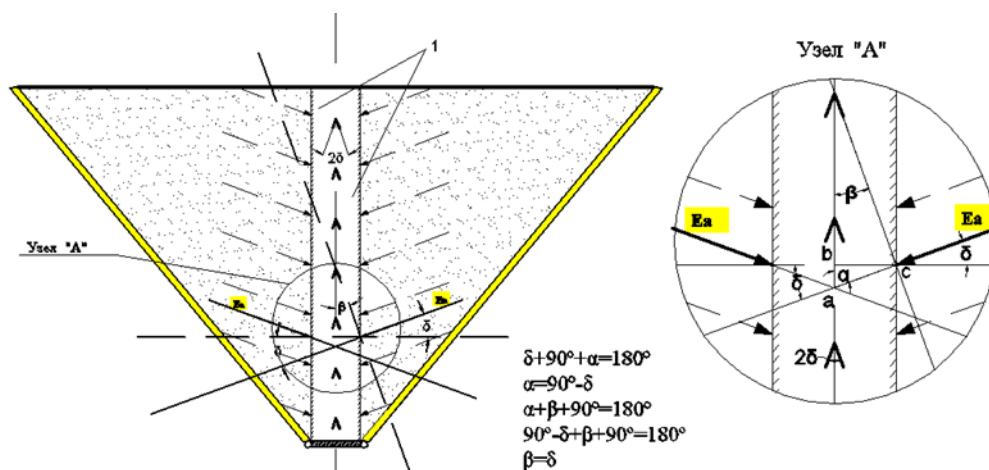


Рис. 2. Углы размещения датчиков для регистрации напряжений в центральной осевой плоскости модели относительно равнодействующего бокового давления:

1 – центральная осевая плоскость

Fig. 2. Location angles of sensors for stress recording in the central axial plane of the model relative to the resultant lateral pressure:

1 – central axial plane



$$90^\circ - \delta + \beta + 90^\circ = 180^\circ;$$

$$\beta = \delta.$$

На основе приведенных выше выражений можно сделать вывод, что значение образованного двумя датчиками угла вдвое больше угла трения эквивалентного материала с центральной вертикальной плоскостью модели δ . Последний одновременно равен также углу наклона равнодействующего бокового давления эквивалентного материала E , приложенного к $1/3$ (считая снизу модели) от высоты центральной вертикальной плоскости модели² [14–20].

На разработанном модельном стенде возможно регистрировать в эквивалентном материале закономерности изменения напряжений, передаваемых в осевую плоскость модели многоярусного отвала со стороны боковых граней ущелья.

Положение двух боковых граней, независимо друг от друга вращающихся вокруг продольной оси модельного стенда, может изменяться от вертикального до горизонтального. Разработанный трехмерный стенд для моделирования имеет возможность с помощью гидравлического домкрата изменять свое положение в вертикальной плоскости.

На основании теории Кулона направление действия полного эквивалента давления E определяется углом отклонения E от нормали, перпендикулярной боковой стенке подпорной стенки, что принимается равным углу трения грунта δ с вертикальной осью плоскости модели [6]. Полное равнодействующее давление на грунт E и угол трения грунта δ с вертикальной осью плоскости модели взаимосвязаны:

$$\delta = \gamma tg^2 \left(45^\circ \mp \frac{\varphi}{2} \right);$$

$$E = \frac{\gamma H^2}{2} tg^2 \left(45^\circ - \frac{\varphi}{2} \right),$$

где γ – плотность отсыпанной грунтовой массы, г/см³; φ – угол внутреннего трения частиц, град.; H – высота засыпки, см.

На основе экспериментов Моллера для практических исследований установлено, что угол δ изменяется в пределах $0,33 \rho < \delta < 0,67 \rho$, а на основе экспериментов Мюллера-

Бреслау $\delta = 0,75 \rho$, где ρ – угол внутреннего трения частиц грунта.

В соответствии с этой теорией определение равнодействующего давления E является приоритетным, особенно при выборе схемы установки датчиков для регистрации напряжений, передаваемых со стороны боковых плоскостей разработанного модельного стенда на центральную вертикальную (осевую) плоскость модели многоярусного отвала.

Исследование бокового воздействия на центральной части модели при варианте отработки модели с одновременным раскрытием двух граней конструкции показало, что характер распределения напряжений, обусловленный весом модельной смеси, в основном остается неизменным, как и при отработке модели с одной подвижной гранью.

Опыты показали, что при равномерном изменении углов наклона двух боковых граней стенда давление на регистрирующие динамометры увеличивается почти вдвое по сравнению с предыдущими опытами, выполненными при одной неподвижной и одной подвижной гранях модели. В этом случае происходит дальнейшее увеличение напряжений на центральном участке модельной смеси, что приводит к интенсивному изменению некоторых физико-механических характеристик эквивалентного материала.

Рост напряжений, зарегистрированных горизонтально и вертикально установленными тензометрическими датчиками прибора АИД-4 в центральной части модели, в зависимости от углов раскрытия боковых граней модели 0, 10, 20, 30, 40, 45, 50 и 60° приведен на рис. 3.

Из рис. 3 видно, что с увеличением угла наклона грани модели до 45° наблюдается рост давления на датчики, установленные в осевой плоскости модельной смеси. При отработке модели с одной подвижной гранью напряжения на горизонтально и вертикально установленные датчики увеличиваются соответственно на 20 и 12 %, а когда одновременно и равномерно раскрываются обе грани модельной конструкции – на 36 и 28 %.

² Ямщиков В. Методы и средства исследований и контроля горных пород и процессов: учебник для вузов. М.: Недра, 1982. 296 с.

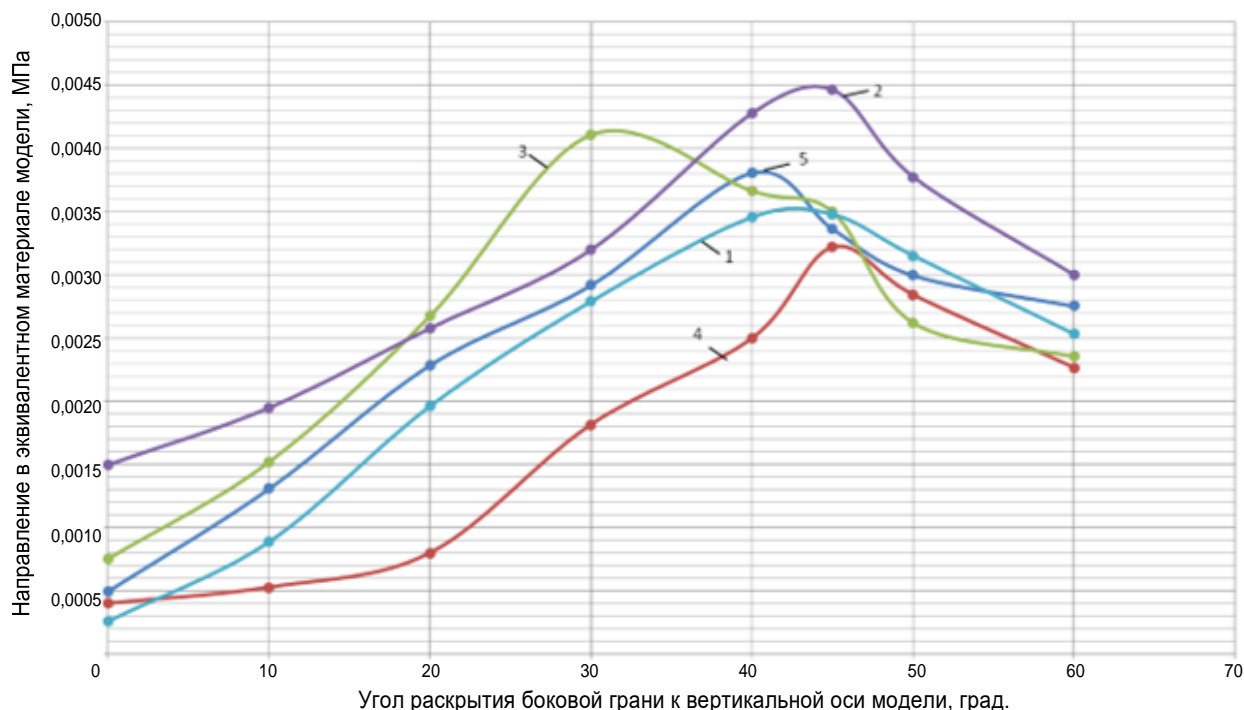


Рис. 3. Зависимость изменения давления на датчики при раскрытии одной грани модели и высоте установки датчиков (считая от основания модели) в эквивалентном материале, равной:

1 – 80; 2 – 60; 3 – 40; 4 – 20; 5 – 0 см

Fig. 3. Dependence of pressure change on the sensors when opening one face of the model and the sensor installation height (counting from the base of the model) in an equivalent material that equals to:

1 – 80; 2 – 60; 3 – 40; 4 – 20; 5 – 0 cm

Заключение

Отработка созданной трехмерной модели позволила решить следующие задачи:

- в зависимости от толщины слоя эквивалентного материала в модели стала возможна оценка напряжений в ее центральной осевой плоскости;

- был установлен характер изменения напряжений в центральной осевой плоскости при неподвижной и вертикально установленной одной грани модели и неизменной высоте модельной смеси в стенде, а также при изменении угла наклона боковой грани модели в интервале от 90 до 0°;

- определен характер изменения напряженного состояния на разных уровнях центральной осевой плоскости модельной смеси при одновременном изменении углов наклона двух боковых граней стенда;

– выявлено, что максимальное значение напряжения эквивалентного материала в центральной части модели достигается на высоте 55–60 см при угле наклона граней в модели, равном 45°.

При помощи физических модельных исследований на разработанном трехмерном стенде становится возможным определение характера изменения напряжений на разных уровнях центральной осевой плоскости при одновременном изменении углов наклона двух боковых граней модельного стенда. Объемное физическое моделирование многоярусного отвала позволяет определять рациональные объемы вскрышных пород, решая тем самым экологически важную задачу формирования многоярусного отвала в ущелье с обоснованием его устойчивости.

Список источников

1. Чугаев Р. Р. Земляные гидротехнические сооружения: Л.: Энергия, 1967. 460 с.
2. Абемян Ц. Х., Микаелян А. А. Устойчивость высокогорных отвалов Каджаранского карьера // Научные

труды Научно-исследовательского горно-металлургического института. Ереван: Изд-во НИГМИ, 1966. С. 31–34.

3. Абемян Ц. Х. Условия применения технологии



отвалообразования с управляемым оползневым процессом на нагорных карьерах // Научные труды Научно-исследовательского горно-металлургического института. Ереван: Изд-во НИГМИ, 1972. С. 25–35.

4. Wang H., Li S., Zheng X. Research progress of geomechanical model test with new technology and its engineering application // *Chinese Journal of Rock Mechanics and Engineering*. 2009. Iss. 28. P. 2765–2771.

5. Hawley P. M., Cunniff J. *Guidelines for mine waste dump and stockpile design*. New York: CSIRO, 2017. 368 p.

6. Пат. № 3350А, Республика Армения, МПК E21C39/00 G01N 33/00 G01N 3/00. Стенд моделирования сооружаемых в ущельях отвалов / С. С. Арзуманян, Л. А. Манукян, А. А. Казарян, Г. Г. Казарян. Заявл.: 08.07.2019.; опубл.: 02.12.2019.

7. Панюков П. Н., Ржевский В. В., Истомин В. В., Гальперин А. М. Геомеханика отвальных работ на карьерах. М.: Недра, 1972. 183 с.

8. Кузнецов Г. Н., Ардашев К. А., Филатов Н. А., Амусин Б. З. Методы и средства решения задач горной геомеханики. М.: Недра, 1987. 248 с.

9. Глушхин Ф. П., Кузнецов Г. Н., Шклярский М. Ф., Павлов В. Н., Злотников М. С. Моделирование в геомеханике. М.: Недра, 1991. 240 с.

10. Morgenstern N. R., Price V. E. The analysis of the stability of general slip surface // *Geotechnique*. 1965. Vol. 15. Iss. 1. P. 79–93. <https://doi.org/10.1680/geot.1965.15.1.79>.

11. Фисенко Г. Л. Устойчивость бортов карьеров и отвалов. М.: Недра, 1965. 378 с.

12. Галуст'ян Э. Л. Методы оценки устойчивости откосов нагорных карьеров // *Горный журнал*. 2002.

№ 11-12. С. 9–12.

13. Манукян Л. А., Казарян А. А., Казарян Г. Г. Разработка схемы установки датчиков для регистрации напряжений в центральной осевой плоскости отвалов горной массы в ущельях // *Известия Национальной академии наук Республики Армения и Национального политехнического университета Армении (серия технических наук)*. 2020. Т. 73. № 1. С. 5–11.

14. Снитко Н. К. Статическое и динамическое давление грунтов и расчет подпорных стенок. Л.: Стройиздат, 1963. 295 с.

15. Шемякин Е. М. О паспорте прочности горных пород // Измерение напряжений в массиве горных пород. Ч. 1. Новосибирск: Изд-во ИГД СО АН СССР, 1974. С. 9–20.

16. Яковлев В. Л., Бурыкин С. И., Ворошилов Г. А. Проблемы освоения нагорных месторождений Полярного Урала // *Горный журнал*. 2001. № 10. С. 47–49.

17. Brady B. T. A mechanical equation of state for brittle rock. Part I. The pre-failure behavior of brittle rock // *International Journal of Rock Mechanics and Mining Sciences & Geomechanics Abstracts*. 1970. Vol. 7. Iss. 4. P. 385–421. [https://doi.org/10.1016/0148-9062\(70\)90035-5](https://doi.org/10.1016/0148-9062(70)90035-5).

18. Sun G. *Rock mass structural mechanism*. Beijing: Science Press, 1988. 36 p.

19. Вылегжанин В. Н., Егоров П. В., Мурашев В. И. Структурные модели горного массива в механизме геомеханических процессов. Новосибирск: Наука, 1990. 295 с.

20. Пендин В. В., Фоменко И. К., Горобцов Д. Н., Никулина М. Е. Комплексное моделирование устойчивости откосов грунтовых отвалов // *Горный журнал*. 2018. № 11. С. 92–96.

References

1. Chugaev R. R. *Earth hydraulic structures*. Leningrad: Energiya; 1967. 460 p. (In Russ.).

2. Abegyan Ts. Kh., Mikaelyan A. A. Stability of high-mountain dumps of the Kajaran open-pit mine. In: *Nauchnye trudy Nauchno-issledovatel'skogo gorno-metallurgicheskogo instituta = Scientific works of the Research Mining and Metallurgical Institute*. Yerevan: Research Mining and Metallurgical Institute; 1966, p. 31–34. (In Russ.).

3. Abegyan Ts. Kh. Application conditions of the technology of controlled landslide dumping in upland mining. In: *Nauchnye trudy Nauchno-issledovatel'skogo gorno-metallurgicheskogo instituta = Scientific works of the Research Mining and Metallurgical Institute*. Yerevan: Research Mining and Metallurgical Institute; 1972, p. 25–35. (In Russ.).

4. Wang H., Li S., Zheng X. Research progress of geomechanical model test with new technology and its engineering application. *Chinese Journal of Rock Mechanics and Engineering*. 2009;28:2765-2771.

5. Hawley P. M., Cunniff J. *Guidelines for mine waste dump and stockpile design*. New York: CSIRO; 2017. 368 p.

6. Arzumanyan S. S., Manukyan L. A., Kazaryan A. A., Kazaryan G. G. *Simulation test bench for dumps constructed in gorges*. Patent RA, no. 3350A; 2019. (In Arm.).

7. Panyukov P. N., Rzhetskii V. V., Istomin V. V.,

Gal'perin A. M. *Geomechanics of dumping operations in open pits*. Moscow: Nedra; 1972. 183 p. (In Russ.).

8. Kuznetsov G. N., Ardashev K. A., Filatov N. A., Amusin B. Z. *Methods and means of solving the problems of mining geomechanics*. Moscow: Nedra; 1987. 248 p. (In Russ.).

9. Glushkhin F. P., Kuznetsov G. N., Shklyarskii M. F., Pavlov V. N., Zlotnikov M. S. *Geomechanical modeling*. Moscow: Nedra; 1991. 240 p. (In Russ.).

10. Morgenstern N. R., Price V. E. The analysis of the stability of general slip surface. *Geotechnique*. 1965;15(1):79-93. <https://doi.org/10.1680/geot.1965.15.1.79>.

11. Fisenko G. L. *Wall stability of open pits and dumps*. Moscow: Nedra; 1965. 378 p. (In Russ.).

12. Galust'yan E. L. Methods for assessing upland pit slope stability. *Gornyi zhurnal*. 2002;11-12:9-12. (In Russ.).

13. Manukyan L. A., Ghazaryan A. A., Ghazaryan G. H. Developing the scheme of sensor installation for determining the stresses in the central axial plane of mine dumps in gorges. *Izvestiya Natsional'noi akademii nauk Respubliki Armeniya i Natsional'nogo politekhnicheskogo universiteta Armenii (seriya tekhnicheskikh nauk) = Proceedings of the NAS RA and NPUA: Technical Sciences*. 2020;73(1):5-11. (In Arm.).



14. Snitko N. K. *Static and dynamic soil pressure and calculation of breast walls*. Leningrad: Stroizdat; 1963. 295 p. (In Russ.).

15. Shemyakin E. M. On the rock strength certificate. In: *Izmerenie napryazhenii v massive gornyx porod = Measurement of stresses in a rock massif*. Part 1. Novosibirsk: Chikanal Institute of Mining of the Siberian Branch of the Academy of Sciences of the Soviet Union; 1974, p. 9–20. (In Russ.).

16. Yakovlev V. L., Burykin S. I., Voroshilov G. A. Development issues of upland deposits of the Polar Urals. *Gornyi zhurnal*. 2001;10:47–49. (In Russ.).

17. Brady B. T. A mechanical equation of state for brittle

rock. Part I. The pre-failure behavior of brittle rock. *International Journal of Rock Mechanics and Mining Sciences & Geomechanics Abstracts*. 1970;7(4):385–421. [https://doi.org/10.1016/0148-9062\(70\)90035-5](https://doi.org/10.1016/0148-9062(70)90035-5).

18. Sun G. *Rock mass structural mechanism*. Beijing: Science Press; 1988. 36 p.

19. Vylegzhanin V. N., Egorov P. V., Murashev V. I. *Structural models of the rock range in the mechanism of geomechanical processes*. Novosibirsk: Nauka; 1990. 295 p. (In Russ.).

20. Pendin V. V., Fomenko I. K., Gorobtsov D. N., Nikulina M. E. Integrated modeling of waste dump slope stability. *Gornyi zhurnal*. 2018;11:92–96. (In Russ.).

Информация об авторе / Information about the author



Казарян Ануш Ашотовна,
научный сотрудник, заведующая Лабораторией геомеханики и горных работ,
Лернаметалургияи институт, ГК «Валлекс»,
г. Ереван, Республика Армения,
anush3108@yandex.ru,
<https://orcid.org/0000-0002-9643-0122>.

Anush A. Khazaryan,
Researcher, Head of the Laboratory of Geomechanics and Mining Operations,
Lernametalurgiai Institute CJSC, Vallex Group,
Yerevan, Republic of Armenia,
anush3108@yandex.ru,
<https://orcid.org/0000-0002-9643-0122>.

Вклад автора / Contribution of the author

Автор выполнила исследовательскую работу, на основании полученных результатов провела обобщение, подготовила рукопись к печати.

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

Конфликт интересов / Conflict of interests

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

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

Информация о статье / Information about the article

Статья поступила в редакцию 15.12.2021; одобрена после рецензирования 21.01.2022; принята к публикации 25.02.2022.

The article was submitted 15.12.2021; approved after reviewing 21.01.2022; accepted for publication 25.02.2022.



Научная статья

УДК 550.812.1:662(082)

<https://doi.org/10.21285/2686-9993-2022-45-1-80-89>

Оценка способов и результатов опробования эфелей и отвалов на рудном месторождении

Икболхон Мамадсахиевич Азизхонов^a, Борис Леонидович Тальгамер^b,
Норали Киямович Усмонов^c

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

^cГорно-металлургический институт Таджикистана, г. Бустон, Республика Таджикистан

Автор, ответственный за переписку: Азизхонов Икболхон Мамадсахиевич, iqbolkhon.zong-90@mail.ru

Резюме. Целью представленного исследования являлась оценка достоверности результатов опробования хвостов обогащения на экспериментальном участке Терекликан месторождения Канджол (Таджикистан). В ходе исследования было дано описание эфелей и отвалов данного участка. Общая длина опробованного интервала составила 12 м, по геологическим признакам (количеству прожилкового кварцевого материала) он был разделен на два локальных интервала длиной 4 и 6 м соответственно. Каждый вид опробования и каждая составная часть процесса опробования, включая исследование минерального и химического состава руд, играют важнейшую роль в определении качества и количества рудной массы (руды), исследование же минерального и химического состава руд применяется при производстве поисково-разведочных работ на рудные полезные ископаемые (свинец, цинк, олово, золото, медь, алюминий, марганец и др.). В ходе работ авторами была обоснована целесообразность вовлечения в эксплуатацию техногенных отложений, сформированных при добыче цветных металлов. Представлена методика и результаты бороздового опробования, выполнена оценка его достоверности. Изложена методика и приведены результаты физико-химического исследования хвостов обогащения с использованием спектрального анализа и атомно-абсорбционного метода. Установлено промышленное значение древних эфелей и отвалов, а также достаточное для разработки содержание в них ценных компонентов. Предложена приемлемая технология переработки эфелей и отвалов при вовлечении их в эксплуатацию.

Ключевые слова: техногенные месторождения, бороздовое опробование, контрольное опробование, вещественный анализ

Для цитирования: Азизхонов И. М., Тальгамер Б. Л., Усмонов Н. К. Оценка способов и результатов опробования эфелей и отвалов на рудном месторождении // Науки о Земле и недропользование. 2022. Т. 45. № 1. С. 80–89. <https://doi.org/10.21285/2686-9993-2022-45-1-80-89>.

Original article

Evaluation of methods and results of dredging waste and dump sampling at ore deposit

Ikbolkhon M. Azizkhonov^a, Boris L. Talgamer^b, Norali K. Usmonov^c

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

^cMining and Metallurgical Institute of Tajikistan, Buston, Tajikistan

Corresponding author: Ikbolkhon M. Azizkhonov, iqbolkhon.zong-90@mail.ru

Abstract. The purpose of the study is to assess the reliability of sampling results of concentration tailings at the experimental site of Tereklikan of Kanjol deposit (Tajikistan). The study involves the description of dredging waste and dumps of the site under investigation. The total length of the sampled interval is 12 m. It was divided into two local intervals of 4 and 6 m long according to geological features (amount of veined quartz material). Each type and component of the sampling process including the study of the mineral and chemical composition of ores is of utmost importance in the determination of the quality and quantity of the ore mass (ore), whereas the study of ore mineral and chemical composition is used during prospecting and exploration works for ore minerals (lead, zinc, tin, gold, copper, aluminum, manganese, etc.). The authors substantiate the feasibility for technogenic deposits formed under non-ferrous metals mining to be involved in operation. The methodology and channel sampling results are presented and the reliability of the latter is assessed. The methodology and results of physico-chemical research of concentration tailings via spectral analysis and atomic absorption method are

© Азизхонов И. М., Тальгамер Б. Л., Усмонов Н. К., 2022



given. The industrial significance of ancient dredging waste and dumps as well as the content of valuable components sufficient for their development has been established. An acceptable technology of dredging waste and dumps processing when involved into operation has been proposed.

Keywords: technogenic deposits, channel sampling, control sampling, material analysis

For citation: Azizkhonov I. M., Talgamer B. L., Usmonov N. K. Evaluation of methods and results of dredging waste and dump sampling at ore deposit. *Nauki o Zemle i nedropol'zovanie = Earth sciences and subsoil use*. 2022;45(1):80-89. (In Russ.). <https://doi.org/10.21285/2686-9993-2022-45-1-80-89>.

Введение

В настоящее время на территории Северного Таджикистана существует несколько горно-обогатительных фабрик, которые выпускают концентраты, являющиеся сырьем для металлургических комбинатов. При этом полный цикл металлургической переработки с выпуском готового металла и изделий из них, а также переработкой отходов металлургического производства, к сожалению, до сих пор не введен в эксплуатацию¹ [1, 2]. Временное же захоронение отходов горнодобывающей промышленности, в свою очередь, является мощным резервом для повышения эффективности комплексного использования минеральных ресурсов в будущем² [3, 4].

Вовлечение в эксплуатацию отходов горнодобывающей и перерабатывающей промышленности является важным фактором интенсификации ресурсоемкости. Это происходит потому, что в данном случае мощность и эффективность использования минерально-сырьевого комплекса повышаются без увеличения добычи сырья за счет дополнительных объемов и видов продукции, снижения общих затрат на их производство, снижения темпов развития собственной сырьевой базы и мощностей по ее освоению [5, 6].

Отвальные хвосты содержат значительное количество ценных компонентов, и их комплексная переработка может существенно расширить сырьевую базу для производства благородных металлов [7]. Кроме этого, вовлечение в эксплуатацию хвостов обогащения позволяет существенно сократить негативное воздействие отходов горно-обогатительного производства на окружающую среду

и значительно уменьшить площадь нарушенных земель³ [8].

Ввиду всего вышесказанного нужно отметить, что одной из важнейших задач в рассматриваемой области является разработка критериев для сравнения перспектив использования отходов в горнодобывающей промышленности того или иного вида продукции.

Материалы и методы исследования

В период с 1959 по 1967 гг. месторождение Канджол планомерно разведывалось Канджолской геологоразведочной партией Управления геологии Таджикской Советской Социалистической Республики. В 1976–1978 гг. Среднеазиатской экспедицией была проведена геолого-экономическая переоценка месторождения. При производстве геолого-съёмочных работ Канджолской геологоразведочной партией были проведены разведочные работы на площади 2500 древних выработок с большим количеством отвалов. Кроме того, выделены площади древних эфелей [9]. Большинство площадей было опробовано на серебро отдельными пересечениями (канавами) или взятием горстьевых проб (рис. 1). В результате проведенных Среднеазиатской экспедицией работ по разведке эфелей и отвалов центральной части участка Терекликан была установлена перспективность освоения запасов руды древних эфелей и отвалов.

Изучение технологических свойств полезного ископаемого обычно проводится с использованием специальных технологических проб, которые исследуются в зависимости от уровня изученности и масштаба месторождения

¹ О драгоценных металлах и драгоценных камнях: закон Республики Таджикистан № 21 от 12.05.2001 г. [Электронный ресурс]. URL: https://base.spinform.ru/show_doc.fwx?rgn=2336 (14.12.2021).

² Абдурахимов С. Я. Проблемы изменения, рационального использования и охраны геологической среды в Таджикистане: дис. ... д-ра геол.-минерал. наук: 25.00.36. Пермь, 2003. 325 с.

³ Голик В. И. Природоохранные технологии разработки рудных месторождений: учеб. пособие. М.: ИНФРА-М, 2014. 190 с.



а



b

Рис. 1. Отбор проб на участке Терекликан месторождения Канджол:

а – общий вид борта канавы; b – место отбора пробы эфелей

Fig. 1. Sampling at the Tereklikan site of the Kanjol deposit:

a – general view of the pit wall; b – site of dredging waste sampling

в лабораторных, полупромышленных и заводских (промышленных) условиях. В практике геологоразведочных работ применяется несколько способов отбора рядовых проб: бороздовый, задииковый, керновый, шпуровой, точечный и способ вычерпывания. Каждый из них применяется в конкретных условиях изучаемого месторождения и зависит как от типа и размеров рудных тел, так и от методов поисков и разведки этого месторождения⁴ [10]. В ходе представленного исследования авторами было проведено определение химического и / или минерального состава изучаемых минералов с целью установления содержания полезных и вредных компонентов / минералов. Используемый авторами тип отбора проб обычно применяется при разведке рудных минералов (свинец, цинк, олово, золото, медь, алюминий и т. д.) [11].

В качестве основного объекта исследования для оценки возможности переработки промышленных отходов был выбран участок Терекликан месторождения Канджол. В ходе исследовательской работы была изучена возможность дополнительного извлечения из отходов ценных компонентов [12, 13].

Результаты исследования и их обсуждение

Как известно, наиболее важной задачей при оценке месторождений является выполнение опробования полезного ископаемого, то есть изучение его качества для получения достоверной информации о среднем содержании в нем ценных компонентов. В связи с этим в ходе данного исследования весь процесс изучения борозд, проводимый механизированным способом с использованием прободоборника алмазного диска, находился под постоянным геологическим наблюдением и контролем. Вес отобранных проб регулярно проверялся путем сравнения фактического веса проб с теоретическим⁵.

Предлагаемый вариант бороздового опробования применялся для характеристики минерализованных рудных зон и зон окорудных изменений, вскрытых канавами. Он с уверенностью может быть назван новым подходом к изучению хвостов обогащения.

Способ борозды чаще всего применяется при исследовании рудных тел в естественных обнажениях и выемках горных выработок (траншеях, разрезах, карьерах, шахтах и т. д.)

⁴ Ермолов В. А. Геология: учебник для вузов. В 2 ч. Ч. 2. Разведка и геолого-промышленная оценка месторождений полезных ископаемых. М.: Изд-во МГГУ, 2005. 392 с.

⁵ Петруха Л. М. Разведка месторождений полезных ископаемых: учеб. пособие. Екатеринбург: Изд-во УГГГА, 2003. 246 с.



и на всех этапах разведки, а также эксплуатационных работ. Он используется для того, чтобы выяснить минеральный и химический состав руд [14]. Большую роль играет при этом способ опробования выбор направления борозды. Оно должно обязательно совпадать с направлением максимальной изменчивости (невыдержанности) распределения оруденения в рудном теле. Таким направлением в большинстве случаев является направление истинной мощности рудного тела – направление вкрест простирания рудного тела⁶.

Длина пробы борозды определяется толщиной рудного тела или опробуемого интервала и его равномерностью. Она изменяется от 0,3–0,4 до 3–4 м. При неоднородном строении рудного тела отбираются секционные пробы при длине секции не менее 0,2–0,3 м по каждой разновидности руды. Бороздовые

пробы длиной более 1 м взяты из мощных руд с однородной структурой и составом (рис. 2, 3).

Поперечное сечение борозды чаще всего является прямоугольным, реже треугольным. Ширина борозды принимается, как правило, больше глубины. Поперечное сечение бороздовой пробы зависит от мощности толщины рудной зоны и характера распределения в ней рудных компонентов [15].

Таким образом, опробование является одной из главных операций, производимых непосредственно в полевых условиях на рудных и других месторождениях твердых полезных ископаемых. Этот вид работ позволяет достоверно оконтурить рудные тела и оценить качество исследуемых руд, выбрать после соответствующих испытаний объективную методику обогащения руд и проводить рациональный металлургический передел минерального сырья или концентрата.

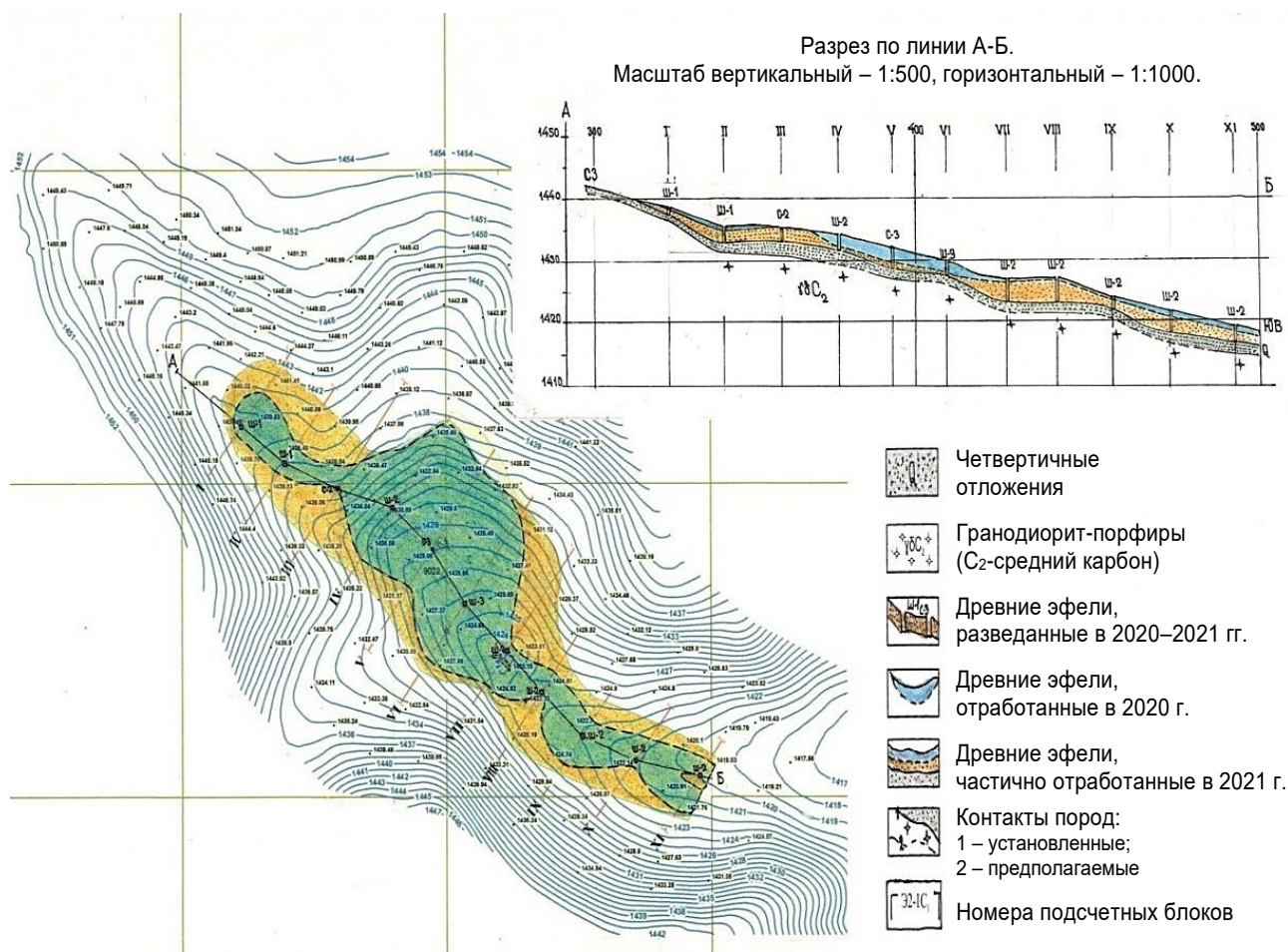


Рис. 2. План опробования эфелей
Fig. 2. Dredging waste testing plan

⁶ Плякин А. М. Опробование твердых полезных ископаемых: метод. указания. Ухта: Изд-во УГТУ, 2009. 23 с.

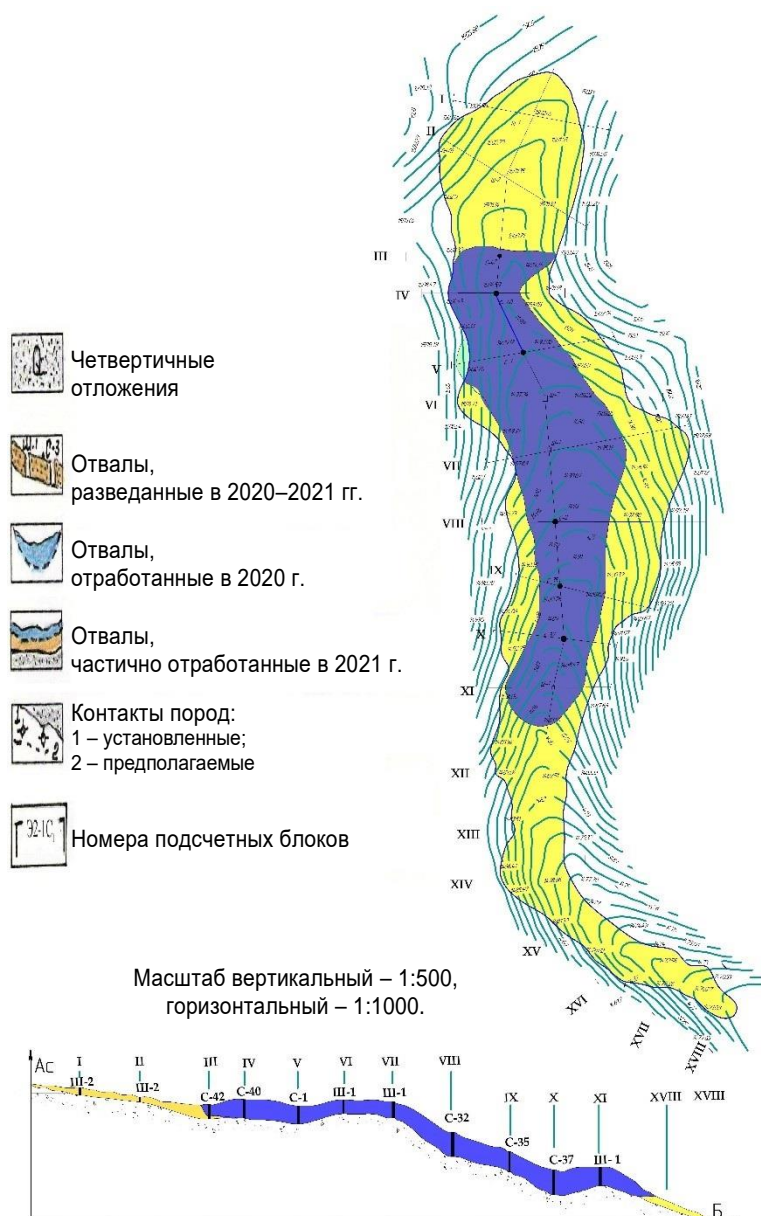


Рис. 3. План опробования отвалов
Fig. 3. Dump testing plan

Опробование является основным методом выявления истинных размеров выявленного месторождения полезного ископаемого, а также обнаружения особенностей распределения в рудах полезных и вредных компонентов.

С целью определения достоверности рядового бороздового опробования с сечением 8×12 см (длина проб – 2,5 м) в тех же интервалах были отобраны бороздовые пробы длиной 2,5 м с сечением 6×24 см с каждой стороны рядовой борозды с последующим объединением их в одну пробу с целью максимального «сближения» рядового и контрольного опробования. Общая длина опробованного интервала составила 12 м, по геологиче-

ским признакам (количеству прожилкового кварцевого материала) он был разделен на два локальных интервала длиной 4 и 6 м соответственно.

Каждый вид и составная часть процесса опробования, включая исследование минерального и химического состава руд, играют важнейшую роль в определении качества и количества рудной массы (руды) [16, 17]. В связи с этим каждому из них должны сопутствовать контрольные процессы: контролю процесса пробоотбора – весовой способ или более надежный способ опробования (например, бороздовое опробование можно проконтролировать валовым опробованием); таким



же способам контроля подлежат способы обработки проб, способы химического, минералогического и любых других видов аналитических методов исследования минерального вещества.

В современной науке и технике для определения химического состава веществ используется множество различных методов [18, 19]. Минерал, найденный геологами, и новые вещества, полученные химиками, отличаются прежде всего по составу. Точное знание химического состава этого сырья необходимо для правильного выполнения технологических процессов в различных отраслях промышленности. Методы химического анализа не всегда отвечают требованиям технологии и науки. Ввиду этого в практику вводятся фи-

зико-химические и физические методы исследования, которые являются более точными. Одним из наиболее важных среди этих методов является метод спектрального анализа, имеющий несколько преимуществ. Открытие спектрального анализа произвело большое впечатление на современников и имело большое значение для развития знаний об окружающем мире⁷ [20].

При изучении отобранных в ходе проведенного авторами исследования проб особое внимание было уделено изучению вещественного состава их основных компонентов с использованием химического, фазового и спектрального анализов (рис. 4). Результаты исследования состава проб приведены в табл. 1 и 2.



Рис. 4. Проведение спектрального анализа проб в лаборатории
Fig. 4. Spectral analysis of samples in the laboratory

Таблица 1. Результаты анализа проб атомно-абсорбционным методом на золото и серебро
Table 1. Analysis results of the samples made by the atomic absorption method for gold and silver

Номер пробы	Координаты			Место взятия пробы в выработке	Длина (интервал) пробы, м	Вес пробы, кг	Au, г/т	Ag, г/т
17008	40°36545	06945181	1220 м	Эфель	2	6,95	0,28	65,3
17009	40°36522	06945189			1,8	5,05	0,15	44,4
17010	40°36488	06945173			12	7,1	0,16	13
17014	40°36429	06945227			1,7	4,95		35,7
17015	40°36413	06945254	1127 м		2	5,25	0,19	45,2
17016	40°36403	06945120	1121 м		2	6,95	0,1	5,7
17020	40°36714	06945180	1140 м	Отвал	1,8	6,1	0,18	18,9
17021	40°36709	06945232	1224 м		1,9	6,2	0,06	32,9
17022	40°36683		1230 м		17	4,95	0,12	30,5
17023	40°36980	06945613	1120 м	Эфель	1,7	5	0,014	29,1
17024	40°36967	06945620	1100 м		1,8	5,65	0,22	22,4
17025	40°36706	06945606	1205 м		1,9	5,8	0,38	58,8
17026	40°36994	06945631	1130 м		1,8	6,1	0,48	45,7

⁷ Александрова Э. А., Гайдукова Н. Г. Аналитическая химия: теоретические основы и лабораторный практикум: учеб пособие. В 2 кн. Кн. 2. Физико-химические методы анализа. М.: Колос, 2011. 352 с.



Таблица 2. Результаты исследования химического состава эфелей и отвалов
Table 2. Study results of chemical composition of dredging waste and dumps

Тело полезного ископаемого	Площадь, м ²	Средняя мощность, м	Объем руды, м ³	Объемный вес, т/м ³	Запасы руды, т	Содержание компонентов			Запасы металла		
						Pb, %	Zn, %	Ag, г/т	Pb, т	Zn, т	Ag, кг
Эфель-2 (забаланс.)	10854	1,65	17936	2	35870	0,3	0,78	166,5	108	279	5973
	512	0,67	344		688			155,6	2,06	5,37	107
Эфель-3 (забаланс.)	2726	1,14	3109		6200		0,77	143	19	48	887
	2402	1,06	2555		5110			113,1	15,3	39,3	578
Итого по эфелям 2 и 3 (забаланс.)	13580	1,55	21045		42090		0,78	162,9	126,3	328	6860
	2914	0,99	2899		5798		0,77	118,1	17,4	44,6	685
Эфель 4	10866	1,07	11585		23180	0,15	0,14	112,4	34,8	32,4	2605,4
Отвал 1 Б-1-С1	19000	1,5	28500		57000						
		1,8	34200		68400						
Итого по эфелю 4 и Б-1-С1, отвалу 1 (баланс.)	29866	1,3	40085		80180						
		1,53	45785		91580						

В результате анализа материального состава посеребренных руд древнего эфеля и отвалов месторождения Канджол было установлено, что пробы представляют серебряные частично окисленные руды, содержащие кроме серебра золото, свинец и цинк. В эфелях и отвалах пробы по вещественному составу схожи и отличаются количественным соотношением слагающих их компонентов. При анализе данных опробования, отличающихся высокой асимметрией распределения полезного компонента, рекомендуется предварительно проводить учет высоких проб и ограничивать их влияние одним из известных способов. Исходя из параметров отвалов и эфелей, их горнотехнической характеристики и местоположения, разработку техногенных отложений целесообразно осуществлять с применением экскаваторно-автотранспортного комплекса с последующим извлечением ценных компонентов путем кучного выщелачивания.

Заключение

На основе вышеизложенного можно сделать следующие выводы:

– по результатам бороздового опробования и минералогического анализа пород древних эфелей и отвалов установлено их промышленное значение;

– главными ценными компонентами эфелей и отвалов являются серебро и золото, к попутным (промышленно-ценным) их компонентам относятся свинец и цинк;

– проведенное механизированным способом бороздовое переопробование канав предшественников показало занижение содержания серебра при ручном (с помощью зубила) способе бороздового опробования;

– для благоприятных условий залегания техногенных отложений рекомендуются механизированные способы опробования, которые позволяют увеличить объем проб и сократить сроки их отбора.

Список источников

1. Хакимов Н., Назаров Х. М., Мирсаидов И. У. Физико-химические и технологические основы переработки отходов промышленности. Душанбе: Мавлави, 2012. 120 с.
2. Абдурахимов С. Я., Абдурахимова М. М., Мадаминаова Я. Геологические прогнозирование техногенных объектов Северного Таджикистана // Ученые

записки Худжандского государственного университета им. академика Б. Гафурова. Серия: Естественные и экономические науки. 2009. № 15. С. 110–125.

3. Абдурахимов С. Я. Инновационно-геоэкологические проблемы природно-техногенного разнообразия Таджикистана. Худжанд: Нури маърифат, 2014. 429 с.



4. Абдурахимов С. Я. Рациональное природопользование в Таджикистане // *Аграрная наука*. 2003. № 6. С. 24–25.
5. Буткевич Г. Р. Проблемы вовлечения отходов горнодобывающего производства в хозяйственную деятельность // *Строительные материалы*. 2013. № 7. С. 62–65.
6. Дерягин А. А., Котова В. М., Никольский А. Л. Оценка перспектив вовлечения в эксплуатацию техногенных месторождений // *Маркшейдерия и недропользование*. 2001. № 1. [Электронный ресурс]. URL: <http://geomar-nedra.ru/articles/mineral-resources/176-assessment-of-prospects-of-technogenic-deposits-development.html> (14.12.2021).
7. Лукомская Г. А., Пилецкий В. М. Извлечение меди, золота и серебра из отвальных продуктов методом кучного тиосульфатного выщелачивания // *Горный журнал*. 2002. № 3. С. 10–12.
8. Маслобоев В. А., Селезнев С. Г., Макаров Д. В., Светлов А. В., Оценка экологической опасности хранения отходов добычи и переработки медно-никелевых руд // *Физико-технические проблемы разработки полезных ископаемых*. 2014. № 3. С. 138–153.
9. Саидов Х. Пересчет запасов древних эфелей и отвалов участка Терекликан месторождения Канджол Республики Таджикистан. Истиклол, 2019. 63 с.
10. Санакулов К. С. К вопросу обоснования и разработки технологии переработки отходов горно-металлургических производств // *Горный вестник Узбекистана*. 2009. № 1. С. 27–38.
11. Санакулов К. С. Концептуальные основы решение проблем переработки техногенного сырья // *Горный вестник Узбекистана*. 2019. № 2. С. 42–56.
12. Иванов А. И., Агеев Ю. Л., Конкин В. Д. К оценке достоверности бороздового опробования жильно-прожилковых рудных зон с крупным золотом на примере Светловского рудного поля (Бодайбинский рудный район) // *Отечественная геология*. 2017. № 4. С. 81–89.
13. Азизхонов И. М., Тальгамер Б. Л. Оценка целесообразности вовлечения в эксплуатацию древних эфелей и отвалов участка Терекликан месторождения Канджол // *Известия академии наук республики Таджикистан. Отделение общественных наук*. 2021. № 1. С. 46–54.
14. Снетков В. И., Соловьев А. А. Методический подход к оценке достоверности данных разведки и опробования на примере рудного месторождения золота // *Горный информационно-аналитический бюллетень (научно-технический журнал)*. 2015. № 4. С. 287–296.
15. Wei Z. A., Yin G., Wan L., Li G. A case study on a geotechnical investigation of drainage methods for heightening a tailings dam // *Environmental Earth Sciences*. 2016. Vol. 75. Iss. 2. P. 106. <https://doi.org/10.1007/s12665-015-5029-8>.
16. Ткач С. М., Баракаева И. Д., Омеляненко П. А. Представительное опробование и статистическое обследование запасов руд // *Горный информационно-аналитический бюллетень*. 2007. № 8. С. 49–54.
17. Разбиралова А. А., Шмелев К. М. Комплексное использование сырья в химической промышленности // *Успехи в химии и химической технологии*. 2014. Т. 28. № 7. С. 47–49.
18. Самихов Ш. Р., Зинченко З. А. Бобохонов Б. А. Полупромышленные испытания отвального выщелачивания забалансовой руды месторождения Джилау // *Золото и технологии*. 2013. № 3. С. 45–49.
19. Ревенко А. Г. Физические и химические методы исследования горных пород и минералов в аналитическом центре ИЗК СО РАН // *Геодинамика и тектонофизика*. 2014. Т. 5. № 1. С. 101–114. <https://doi.org/10.5800/GT-2014-5-1-0119>.
20. Кривошеев В. И., Лупов С. Ю. О некоторых возможностях и проблемах современного цифрового спектрального анализа // *Вестник Нижегородского университета им. К. И. Лобачевского*. 2011. № 5. С. 109–117.

References

1. Khakimov N., Nazarov Kh. M., Mirsaidov I. U. *Physico-chemical and technological bases for industrial waste processing*. Dushanbe: Mavlavi; 2012. 120 p. (In Russ.).
2. Abdurakhimov S. Ya., Abdurakhimova M. M., Madaminova Ya. Geological forecasting of technogenic objects in Northern Tajikistan. *Uchenye zapiski Khudzhandskogo gosudarstvennogo universiteta im. akademika B. Gafurova. Seriya: Estestvennye i ekonomicheskie nauki*. 2009;15:110-125. (In Russ.).
3. Abdurakhimov S. Ya. *Innovative and geoecological problems of natural and technogenic diversity of Tajikistan*. Khujand: Nuri ma'rifat; 2014. 429 p. (In Russ.).
4. Abdurachimov S. Ya. Rational use of nature in Tad-jikistan. *Agrarnaya nauka = Agrarian science*. 2003;6:24-25. (In Russ.).
5. Butkevich G. R. Problems of mining waste involvement in economic activity. *Stroitel'nye materialy = Construction Materials*. 2013;7:62-65. (In Russ.).
6. Deryagin A. A., Kotova V. M., Nikol'skii A. L. The assessment of prospects of technogenic deposits development. *Marksheideriya i nedropol'zovanie*. 2001;1. Available from: <http://geomar-nedra.ru/articles/mineral-resources/176-assessment-of-prospects-of-technogenic-deposits-development.html> [Accessed 14th December 2021]. (In Russ.).
7. Lukomskaya G. A., Piletskii V. M. Extraction of copper, gold and silver from waste products by heap thiosulfate leaching. *Gornyi zhurnal*. 2002;3:10-12. (In Russ.).
8. Masloboev V. A., Makarov D. V., Svetlov A. V., Seleznev S. G. Assessment of eco-hazard of copper-nickel ore mining and processing waste. *Fiziko-tehnicheskie problemy razrabotki poleznykh iskopaemykh*. 2014;3:138-153. (In Russ.).
9. Saidov Kh. *Recalculation of the reserves of ancient dredging waste and dumps of the Tereklikan site of the Kanjol deposit of the Republic of Tajikistan*. Istiklol; 2019. 63 p. (In Russ.).



10. Sanakulov K. S. To substantiation and development of technology for mining and metallurgical industry waste processing. *Gornyi vestnik Uzbekistana = Mining bulletin of Uzbekistan*. 2009;1:27-38. (In Russ.).

11. Sanakulov K. S. Conceptual bases for solving the problems of processing technological raw materials. *Gornyi vestnik Uzbekistana = Mining bulletin of Uzbekistan*. 2019;2:42-56. (In Russ.).

12. Ivanov A. I., Ageev Yu. L., Konkin V. D. Reliability assessment of trenching vein-stringer ore zones containing coarse gold exemplified by Svetlovskoye ore field (Bodaibo ore district). *Otechestvennaya Geologiya = National Geology*. 2017;4:81-89. (In Russ.).

13. Azizhonov I. M., Talgamer B. L. Assessment of the feasibility of involving the ancient ephels and dumps of the Tereklikan section of the Kandzhol deposit into operation. *Izvestiya akademii nauk respublikii Tadzhikistan. Otdelenie obshchestvennykh nauk = News of the Academy of Sciences of the Republic of Tajikistan. Department of Social Sciences*. 2021;1:46-54. (In Russ.).

14. Snetkov V. I., Solov'yov A. A. Methodical approach to the assessment of reliability of the intelligence data and approbation on the example of the ore gold deposit. *Gornyi informatsionno-analiticheskii byulleten' (nauchno-tekhnicheskii zhurnal) = Mining informational and analytical bulletin (scientific and technical journal)*. 2015;4:287-296. (In Russ.).

15. Wei Z. A., Yin G., Wan L., Li G. A case study on a geotechnical investigation of drainage methods for heightening a tailings dam. *Environmental Earth Sciences*. 2016;75(2):106. <https://doi.org/10.1007/s12665-015-5029-8>.

16. Tkach S. M., Barakaeva I. D., Omel'yanenko P. A. Representative sampling and statistical survey of ore reserves. *Gornyi informatsionno-analiticheskii byulleten' = Mining informational and analytical bulletin*. 2007;8:49-54. (In Russ.).

17. Razbiralova A. A., Shmelev K. M. Complex use of raw materials in the chemical industry. *Uspekhi v khimii i khimicheskoi tekhnologii = Advances in Chemistry and Chemical Technology*. 2014;28(7):47-49. (In Russ.).

18. Samikhov Sh. R., Zinchenko Z. A. Bobokhonov B. A. Semi-industrial testing of dump leaching of Dzhilau deposit off-balance ore. *Zoloto i tekhnologii*. 2013;3:45-49. (In Russ.).

19. Revenko A. G. Physical and chemical methods of researching rocks and minerals in the analytical centre of the Institute of the Earth's Crust, SB RAS. *Geodinamika i tektonofizika = Geodynamics & Tectonophysics*. 2014; 5(1):101-114. (In Russ.). <https://doi.org/10.5800/GT-2014-5-1-0119>.

20. Krivosheev V. I., Lupov S. Yu. On some opportunities and problems of modern digital spectral analysis. *Vestnik Nizhegorodskogo universiteta im. K. I. Lobachevskogo = Vestnik of Lobachevsky University of Nizhni Novgorod*. 2011;5:109-117. (In Russ.).

Информация об авторах / Information about the authors



Азизхонов Икболхон Мамадсахиевич,
аспирант,
Институт недропользования,
Иркутский национальный исследовательский технический университет,
г. Иркутск, Россия,
iqboldkhon.zong-90@mail.ru.
Ikboldkhon M. Azizkhonov,
Postgraduate Student,
Institute of Subsoil Use,
Irkutsk National Research Technical University,
Irkutsk, Russia,
iqboldkhon.zong-90@mail.ru.



Тальгамер Борис Леонидович,
доктор технических наук, профессор,
заведующий кафедрой разработки месторождений полезных ископаемых,
Институт недропользования,
Иркутский национальный исследовательский технический университет,
г. Иркутск, Россия,
talgamer@istu.edu,
<https://orcid.org/0000-0003-1413-0116>.
Boris L. Talgamer,
Dr. Sci. (Eng.), Professor,
Head of the Department of Mineral Deposits Development,
Institute of Subsoil Use,
Irkutsk National Research Technical University,
Irkutsk, Russia,
talgamer@istu.edu,
<https://orcid.org/0000-0003-1413-0116>.



Усмонов Норали Киямович,
старший преподаватель кафедры геологии и нефтегазовых работ,
Горно-металлургический институт Таджикистана,
г. Бустон, Республика Таджикистан,
noraliusmonov@mail.ru.
Noralis K. Usmonov,
Senior Lecturer of the Department of Geology and Oil and Gas Works,
Mining and Metallurgical Institute of Tajikistan,
Buston, Tajikistan,
noraliusmonov@mail.ru.

Вклад авторов / Contribution of the authors

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

Конфликт интересов / Conflict of interests

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

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

Информация о статье / Information about the article

Статья поступила в редакцию 17.12.2021; одобрена после рецензирования 20.01.2022; принята к публикации 25.02.2022.

The article was submitted 17.12.2021; approved after reviewing 20.01.2022; accepted for publication 25.02.2022.



Уважаемые авторы!

Требования к оформлению научных статей, изложенные ниже, разработаны редакцией журнала для того, чтобы помочь Вам предоставить все необходимые для публикации сведения и избежать наиболее распространенных ошибок.

1. Научный журнал «Науки о Земле и недропользование» принимает к публикации научные материалы в виде статей по следующим тематикам:

- 25.00.22. Геотехнология (подземная, открытая и строительная) (технические науки),
- 25.00.35. Геоинформатика (геолого-минералогические науки);
- 1.6.9. Геофизика (технические науки),
- 1.6.9. Геофизика (геолого-минералогические науки),
- 1.6.10. Геология, поиски и разведка твердых полезных ископаемых, минерагения (геолого-минералогические науки),
- 2.8.1. Технология и техника геологоразведочных работ (технические науки),
- 2.8.3. Горнопромышленная и нефтегазопромысловая геология, геофизика, маркшейдерское дело и геометрия недр (технические науки),
- 2.8.3. Горнопромышленная и нефтегазопромысловая геология, геофизика, маркшейдерское дело и геометрия недр (геолого-минералогические науки).

2. Приоритетными для публикации являются статьи в области междисциплинарных и мультидисциплинарных исследований, а также результаты работ с использованием цифровых технологий.

3. Статьи принимаются на русском, английском, китайском и монгольском языках от авторов, работающих в российских и иностранных вузах, академических и отраслевых научно-исследовательских институтах, а также производственных горно-геологических организациях.

4. Статья сопровождается:

- электронными версиями всех документов (скан), в том числе: авторского заявления, заполненного и подписанного всеми соавторами статьи; авторского договора; акта экспертного заключения о возможности открытой публикации материалов; сведений обо всех авторах на русском и английском языках с указанием названия вуза, организации, учреждения, должности и структурного подразделения, наличия ученой степени, ученого звания, почтового и электронного адресов каждого автора статьи;
- цветными портретными фотографиями авторов на светлом фоне (деловой стиль) в хорошем качестве в формате *.JPEG;
- по желанию автора в статье могут быть указаны его профили в системах цитирования и другие сведения (профили в РИНЦ, ORCID, Scopus, в других системах цитирования, можно предоставить ссылку на личную страницу в Интернете, включая страницы в социальных сетях).

Обращаем Ваше внимание, что вся перечисленная выше информация публикуется в журнале в открытом доступе!

5. Статьи принимаются ответственным секретарем в электронном виде в формате Microsoft Word для Windows по электронной почте nzn@istu.edu. Шрифт – Times New Roman, размер шрифта – 12 (строки через 1 интервал), перенос слов – автоматический. Параметры страницы: отступы сверху и снизу – 2,5 см, слева и справа – 2 см, абзацный отступ – 0,6 см, ориентация страницы – книжная.

6. Объем текста – от 10000 знаков, включая пробелы, иллюстрационный материал – до 6 рисунков.

7. Статьи должны быть структурированы и выполнены по международному стандарту IMRAD. Структура статьи: индекс УДК, название статьи, фамилия, имя, отчество авторов, название учреждения, где выполнена работа, аннотация и ключевые слова на языке оригинала



(русском / китайском / монгольском) и английском языках, введение, цель исследования, материал и методы исследования, результаты исследования и их обсуждение, выводы или заключение, библиографический список и references, критерии авторства, конфликт интересов и сведения об авторах (вся информация предоставляется одним файлом, названным следующим образом: *Фамилия первого автора – Первые три-четыре слова названия.doc*).

8. Рекомендуемая длина названия статьи – до 100 знаков с пробелами. Название статьи должно быть лишено сокращений, аббревиатур, описывать содержание статьи точно и конкретно, при этом оно должно быть достаточно длинным, чтобы однозначно выразить главную идею статьи, и коротким настолько, чтобы ни одно слово нельзя было выбросить без потери смысла.

9. Аннотация должна отражать основную идею статьи, поскольку для большинства читателей она является главным источником информации о представленном исследовании. Объем аннотации – 1500–2000 знаков, примерная структура: цель, методы, предмет, объект и результаты исследования, выводы. Не следует ссылаться на таблицы и / или рисунки, приведенные в основном в тексте статьи, а также использованную литературу, поскольку аннотации также публикуются отдельно от статьи. Не используйте в аннотации сокращения, аббревиатуры, а также формулы, так как аннотации в большинстве баз данных, начиная с РИНЦ, публикуются в формате, исключающем отображение формул.

Ключевые слова должны отражать суть исследования, способствовать работе поисковых систем, по количеству не превышать 10 единиц, словосочетания – не более 3 единиц.

10. Формулы в тексте должны быть набраны в специальном редакторе формул. 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 языке текста статьи. Помимо текста рукописи рисунки должны быть предоставлены отдельными файлами. Векторная графика 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 JPEG (сохранение в формате 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 законы, государственные стандарты, положения, диссертации и авторефераты, учебники и учебные пособия, справочники, словари и энциклопедии, а также геологические карты. При необходимости обращения к этим источникам ссылку на них следует размещать в подстрочной сноске. Редакционная коллегия рекомендует в списке литературы ссылаться на статьи из журналов, входящих в международные базы данных по глобальным индексам цитирования (Scopus, Web of Science и другие).

14. Список литературы составляется в двух вариантах. В библиографическом описании статьи необходимо указывать всех авторов. Первый вариант (библиографический список) оформляется на языке источника в соответствии с ГОСТ Р 7.0.5 2008. Второй вариант (references) оформляется в виде транслитерации русского текста в латиницу с переводом на английский язык и служит для отслеживания цитируемости авторов. Примеры оформления источников в списках можно посмотреть на нашем сайте в разделе «Требования к статьям».

15. При подаче статьи авторами предоставляются на английском языке следующие элементы работы: название статьи, сведения об авторах, аннотация, ключевые слова, благодарности, названия таблиц и подрисуночные подписи, библиография.

16. Авторы статей должны придерживаться обязанностей, предусмотренных «Редакционной политикой журнала».

17. Редакция оставляет за собой право отклонять статьи, не отвечающие указанным требованиям. Поступающие в редакцию материалы возврату не подлежат.

18. Редакция оставляет за собой право на научное и литературное редактирование статей с последующим согласованием с авторами.

19. Представленные статьи проходят проверку на наличие заимствований.

20. Журнал выпускается с периодичностью 4 номера в год.

Внимание! Публикация статей является бесплатной.

Мы приглашаем Вас к участию в нашем проекте в качестве авторов, рекламодателей и читателей.

По вопросам публикации обращаться по адресу: 664074, Россия, г. Иркутск, ул. Лермонтова, 83, Иркутский национальный исследовательский технический университет, редколлегия, ауд. Е-317.

Главный редактор 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

Заместитель главного редактора Сергей Юрьевич Красноштанов, тел.: +7 (3952) 405101, e-mail: geo_info@istu.edu

Статьи следует направлять ответственному секретарю Виталию Александровичу Храмовских через личный кабинет на сайте www.nznj.ru или по электронной почте nzn@istu.edu; тел.: +7 (3952) 405069, адрес: 664074, Россия, г. Иркутск, ул. Лермонтова, 83, ауд. Ж-04.



Образец оформления статьи

УДК 549.09

Минералого-технологические типы руд Томинского месторождения меди (Южный Урал)

Елена Михайловна Курчевская, Марина Владиславовна Яхно^b,

Аркадий Евгеньевич Сенченко^c

^{a,c}НИИПИ «Технологии обогащения минерального сырья», г. Иркутск, Россия

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

Автор, ответственный за переписку: Яхно Марина Владиславовна, ymar@istu.edu

Резюме: Цель. Цель данного исследования заключается в изучении технологических типов руд Томинского месторождения меди, а также минерального состава вмещающих пород и руд каждого из трех типов, выявлении минералогических и структурно-текстурных особенностей руд, выявлении взаимосвязи изменения рудной минерализации и степени метаморфизма для каждого типа руд. **Методы.** Рудные тела Томинского медно-порфирового месторождения, залегающие в диоритах и кварцевых диоритах, представляют собой прожилковые и прожилково-вкрапленные скопления в зонах дробления. На месторождении широко развиты метасоматиты кварц-серicitовой формации. Изучение типов руд проводилось с использованием микроскопов. **Результаты.** В результате выделено три геолого-технологических типа руд в пределах Томинского месторождения. Первый тип представлен первичными сульфидными рудами, которые наблюдаются в среднем ниже глубины 50–55 м. По составу это хлорит-мусковит-кварцевые метасоматиты. Вмещающие породы представлены серицитизированными, хлоритизированными и карбонатизированными диоритами. В составе руд преобладают халькопирит и пирит. Практически вся медь содержится в халькопирите. Второй тип – это рудные зоны вторичного сульфидного обогащения. Этот тип сложен первичными и вторичными сульфидами меди. Все породы аргиллизированные и представлены метасоматитами различного состава. Все виды пород несут в себе рудную минерализацию. К третьему типу относятся окисленные руды, которые образуют зону окисления месторождения. Они делятся на три подтипа: глинистые, глинисто-щебнистые и щебнистые руды. Глинистые руды залегают в самых верхних частях коры выветривания, глинисто-щебнистые руды слагают центральную ее часть, а руды в щебнистых образованиях отмечены в нижних горизонтах. Представлено петрографическое описание каждого из типов. Выявлены минералогические и структурно-текстурные особенности руд. В результате изучения петрографического состава каждого типа руд установлена различная степень метаморфизма и вследствие этого – изменение рудной минерализации. **Выводы.** Прослеживается влияние метасоматических процессов, изменивших строение и минеральный состав руд. Для первого типа руды характерно наличие первичных пород – диоритов с насыщенной сульфидной вкрапленностью и с незначительными метасоматическими изменениями. В зоне вторичного обогащения породы претерпели интенсивное метасоматическое изменение. Породы этой зоны насыщены гидроксидами железа. Для зоны интенсивного выветривания характерны глинистые и хлоритизированные породы. Рудная минерализация представлена исключительно окисленными минералами. Сульфиды единичны. Различия в минеральном составе трех типов руд влияют на выбор способов переработки руды в пределах Томинского месторождения.

Ключевые слова: Томинское месторождение, медно-порфировое оруденение, метаморфизм, технологические типы руд

Финансирование:

Благодарности:

Mineralogical and technological types of Tominskoye deposit copper ores (Southern Ural)

Elena M. Kurchevskaya^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. Chalcopryite contains carbonated diorites. Chalcopryite and pyrite are predominant elements in ore composition. Chalcopryite contains almost all of the copper. The second type includes the ore zones of secondary sulfide concentration. This type is composed of primary and secondary copper sulfides. All the rocks are dirty argillaceous and are represented by metasomatic rocks of different composition. All types of rocks feature ore mineralization. The third type covers oxidized ores, which form the oxidation zone of the deposit. They are divided into three subtypes: clay, claydetrital and detrital ores. Clay ores occur in the uppermost parts of the crust of weathering. Clay-detrital ores compose its central part, while ores in detrital formations have been found in the lower horizons. Each of the type is given a petrographic description. Mineralogical and structural-textural features of ores are identified. The study of the petrographic composition of each type of ores showed a varying degree of metamorphism that resulted in changes in ore mineralization. **Conclusions.** The influence of metasomatic processes is indicated. The last have changed the structure and mineral composition of ores. The presence of primary rocks – diorites with saturated sulfide impregnation and insignificant metasomatic alterations is typical for the first type of ore. The rocks in the zone of secondary concentration have undergone intense metasomatic alteration. These rocks are saturated with iron hydroxides. The presence of clay and chloritized rocks characterize the zone of intense weathering. Ore mineralization is represented exclusively by oxidized minerals. Sulfides are rare. Variations in the mineral composition of the three types of ores influence the choice of ore processing methods at Tominskoye ore deposit.

Keywords: Tominskoye field, porphyry copper mineralization, metamorphism, technological ore types

Funding:

Acknowledgements:

Далее идут **текст статьи** (в виде: введение, цель исследования, материалы и методы исследования, результаты исследования и их обсуждение, заключение), **список источников** (references), **вклад авторов** (contribution of the authors) и **конфликт интересов** (conflict of interests).

Информация об авторах / Information about the authors

Фото
автора

Курчевская Елена Михайловна,
старший научный сотрудник,
НИИПИ «Технологии обогащения минерального сырья»,
г. Иркутск, Россия,
kurchevskaya@tomsgroup.ru,
ORCID.

Elena M. Kurchevskaya,
Senior Researcher,
Scientific Research and Design Institute “Technologies of Minerals Separation”,
Irkutsk, Russia,
kurchevskaya@tomsgroup.ru,
ORCID.

Фото
автора

Яхно Марина Владиславовна,
старший преподаватель кафедры геологии и геохимии полезных ископаемых,
Иркутский национальный исследовательский технический университет,
г. Иркутск, Россия,
ymar@istu.edu,
ORCID.

Marina V. Yakhno,
Senior Lecturer of the Department of Geology and Geochemistry of Minerals,
Irkutsk National Research Technical University,
Irkutsk, Russia,
ymar@istu.edu,
ORCID.

Фото
автора

Сенченко Аркадий Евгеньевич,
генеральный директор,
НИИПИ «Технологии обогащения минерального сырья»,
г. Иркутск, Россия,
senchenko@tomsgroup.ru,
ORCID.

Arkady E. Senchenko,
CEO,
Scientific Research and Design Institute “Technologies of Minerals Separation”,
Irkutsk, Russia,
senchenko@tomsgroup.ru,
ORCID.

НАУКИ О ЗЕМЛЕ И НЕДРОПОЛЬЗОВАНИЕ

12+

Научный журнал

Том 45 № 1 (78) 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 28.03.2022 г. Формат 60×90/8.
Бумага офсетная. Печать цифровая. Усл. печ. л. 12,5.
Тираж 500 экз. Зак. 25. 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