

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

НАУКИ О ЗЕМЛЕ И НЕДРОПОЛЬЗОВАНИЕ

Tom Vol. 46 № 3 2023

EARTH SCIENCES AND SUBSOIL USE

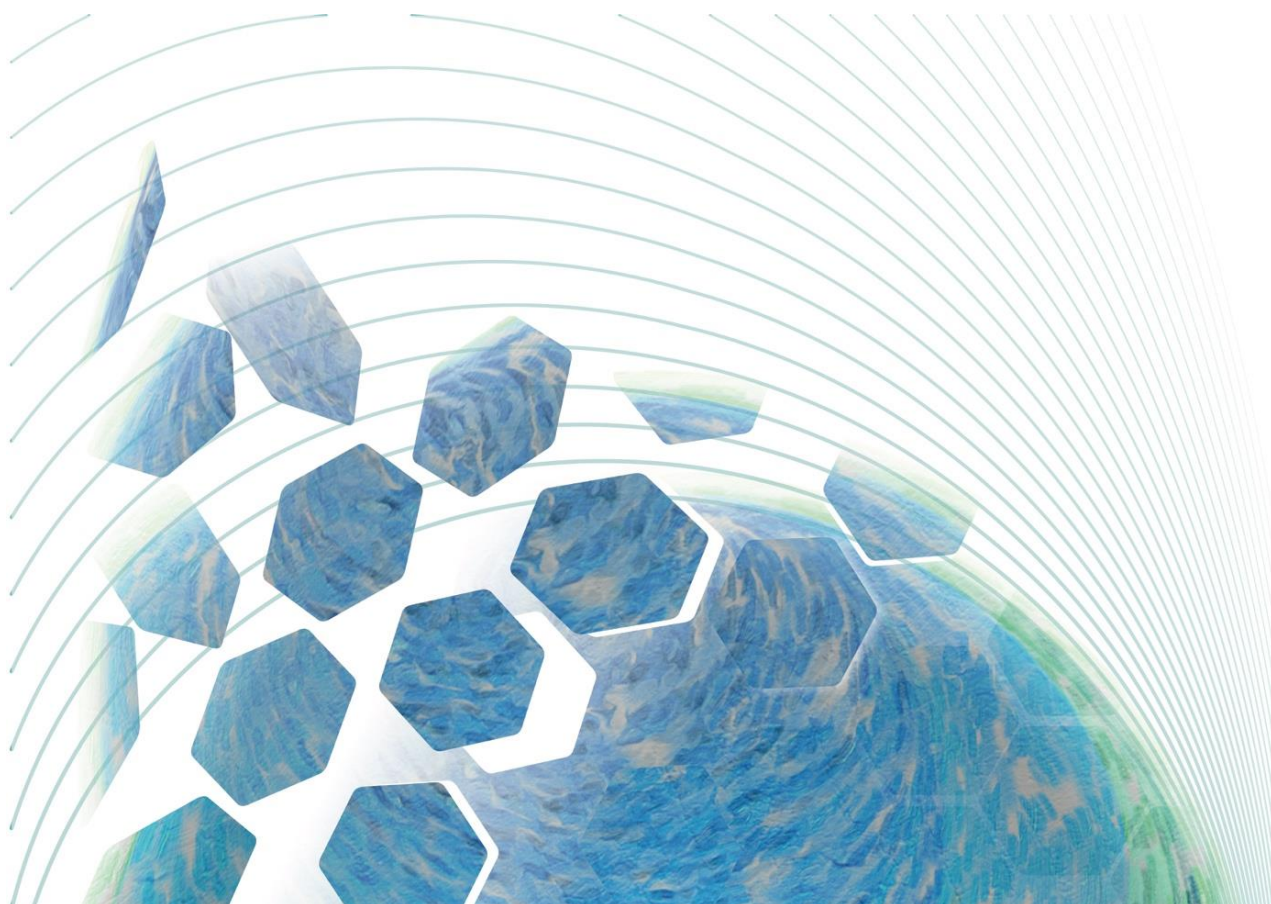
ISSN 2686-9993 (print)
ISSN 2686-7931 (online)

НАУКИ О ЗЕМЛЕ И НЕДРОПОЛЬЗОВАНИЕ

Том
Vol. 46 № 3 2023

EARTH SCIENCES AND SUBSOIL USE

NAUKI O ZEMLE
I NEDROPOL'ZOVANIE



Редакционный совет

Кузьмин М.И., академик РАН, Институт геохимии СО РАН (г. Иркутск, Россия)

Гладкочуб Д.П., член-корр. РАН, Институт земной коры СО РАН (г. Иркутск, Россия)

Скляр Е.В., член-корр. РАН, Институт земной коры СО РАН (г. Иркутск, Россия)

Гордиенко И.В., член-корр. РАН, Геологический институт СО РАН (г. Улан-Удэ, Россия)

Корняков М.В., д-р техн. наук, доцент, ректор, Иркутский национальный исследовательский технический университет (г. Иркутск, 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)

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:

Паршин А.В., канд. геол.-минерал. наук, профессор практики, научный руководитель института «Сибирская школа геонаук», Иркутский национальный исследовательский технический университет (г. Иркутск, Россия)

Заместитель главного редактора:

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

Ответственный секретарь:

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

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

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

Периодичность выхода – 4 раза в год

Учредитель:

ФГБОУ ВО «Иркутский национальный исследовательский технический университет»

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

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

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

© ФГБОУ ВО «Иркутский национальный
исследовательский технический
университет», 2023

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)

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

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

Parshin A.V., Cand. Sci. (Geol. & Mineral.), Professor, Scientific Director of the Siberian School of Geosciences, Irkutsk National Research Technical University (Irkutsk, Russia)

Deputy Editor-in-Chief

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

Executive secretary

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

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

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

Periodicity: 4 times a year

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

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

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

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

© Federal State Budget Educational
Institution of Higher Education
"Irkutsk National Research
Technical University", 2023



СОДЕРЖАНИЕ

Содержание.....	268
Геофизика	
Нерадовский Л.Г. Картировочные возможности метода дистанционного индуктивного зондирования в криолитозоне Южной Якутии.....	270
Геология, поиски и разведка твердых полезных ископаемых, минерагения	
Аузина Л.И. Типизация гидрогеологических условий на месторождениях полезных ископаемых методом системного анализа.....	282
Константинов К.М. Динамическая физико-геологическая модель сложной складчатости по палеомагнитным данным.....	289
Яковлева А.А., Константинова М.В., Гусева Е.А. Характеристики прибрежных песков на территории Вьетнама.....	306
Горнопромышленная и нефтегазопромысловая геология, геофизика, маркшейдерское дело и геометрия недр	
Ланкин Ю.К., Вахромеев А.Г. Методика опытно-фильтрационных исследований (выпусков) из высоконапорных межселевых продуктивных залежей промышленных литиеносных рассолов галогенно-карбонатной гидрогеологической формации Сибирской платформы.....	315
К юбилейным датам	
Рапацкая Л.А. О некоторых исторических аспектах в образовательной и научной сферах России и Монголии.....	321
К сведению авторов.....	332



CONTENTS

Contents.....	269
---------------	-----

Geophysics

Neradovskii L.G. Mapping capabilities of geometric EM induction sounding in southern Yakutia permafrost.....	270
--	-----

Geology, prospecting and exploration of solid minerals, minerageny

Auzina L.I. Typification of hydrogeological conditions in mineral deposits by system analysis method.....	282
Konstantinov K.M. Dynamic physical-geological model of complex folding according to paleomagnetic data.....	289
Yakovleva A.A., Konstantinova M.V., Guseva E.A. Characteristics of coastal sands in Vietnam.....	306

Applied mining and petroleum field geology, geophysics, mine surveying and subsoil geometry

Lankin Yu.K., Vakhromeev A.G. Methodology of experimental filtration studies (releases) from high-pressure inter-salt productive deposits of industrial lithium-bearing brines of the hydrogeological halogen-carbonate formation of the Siberian platform.....	315
---	-----

Anniversaries

Rapatskaya L.A. Some historical aspects of education and research in Russia and Mongolia.....	321
Information for the Authors.....	332



ГЕОФИЗИКА

Научная статья
УДК 550.379+550.85
EDN: SPMFDZ
DOI: 10.21285/2686-9993-2023-46-3-270-281



Картировочные возможности метода дистанционного индуктивного зондирования в криолитозоне Южной Якутии

Л.Г. Нерадовский^а

^аИнститут мерзлотоведения им. П.И. Мельникова СО РАН, г. Якутск, Россия

Резюме. Цель представленного исследования заключалась в рассмотрении возможностей метода геофизики в решении задачи количественной оценки прочности осадочных пород, слагающих основание инженерных сооружений на станции «Кюргеллях», расположенной по Амуро-Якутской железнодорожной магистрали в 572 км от административного центра Южной Якутии г. Нерюнгри (Россия). Решение поставленной задачи было осуществлено методом дистанционного индуктивного зондирования с применением новой технологии изучения процесса затухания в неоднородной анизотропной геологической среде гармонического поля вертикального магнитного диполя на частоте 1,125 и 0,281 МГц в промежуточной зоне разноса 5–100 м. Сравнительный анализ установил согласие в изменении геолого-геофизических оценок средней прочности лабораторных водонасыщенных образцов и прогнозируемого в таком же состоянии массива осадочных пород на сопоставимой глубине 6–12 м. Мера согласия при использовании наиболее адекватного уравнения степенной функции высока и по приведенному значению коэффициента множественной детерминации равна 0,815. Это означает, что среди всех мерзлотно-грунтовых факторов вклад фактора прочности в результат затухания электромагнитного поля на отмеченных частотах и разносе доминирует и составляет не меньше 80 %. Благодаря этому апробированный метод геофизики правильно картирует границы распространения осадочных пород разной прочности. В разной степени ослабленные дробленые и трещиноватые породы с прочностью ниже 40–35 МПа приурочены к разнонаправленным тектоническим разрывным нарушениям, образующим структуру, близкую к полигональной. По данным геофизики, границы структуры четко прорисовываются на глубине 12,3–27,5 м, где доминируют породы прочной категории (50–120 МПа). Метод дистанционного индуктивного зондирования рекомендуется применять на всех стадиях изысканий с целью районирования застраиваемых территорий Южной Якутии по категории прочности скально-полускальных грунтов.

Ключевые слова: станция «Кюргеллях», массив осадочных пород, скально-полускальные грунты, прочность, изыскания, дистанционное индуктивное зондирование, глубина

Финансирование: Работа выполнена по бюджетному финансированию в лаборатории инженерной геокриологии Института мерзлотоведения им. П.И. Мельникова по проекту Сибирского отделения Российской академии наук «Устойчивость природно-технических систем в криолитозоне и разработка технологий использования криогенных ресурсов» (регистрационный номер АААА-А20-120111690011-9).

Благодарности: Автор выражает благодарность бывшему главному геофизику ОАО «ЮжЯкутТИСИЗ» Г.К. Суворовой за ценные консультации в вопросах производства геофизических работ и ныне покойному геологу АО «ЯкутТИСИЗ» В.Е. Немцевой за отличную документацию кернa скважин.

Для цитирования: Нерадовский Л.Г. Картировочные возможности метода дистанционного индуктивного зондирования в криолитозоне Южной Якутии // Науки о Земле и недропользование. 2023. Т. 46. № 3. С. 270–281. <https://doi.org/10.21285/2686-9993-2023-46-3-270-281>. EDN: SPMFDZ.



GEOFYSICS

Original article

Mapping capabilities of geometric EM induction sounding in southern Yakutia permafrost

Leonid G. Neradovskii^a

^aMelnikov Permafrost Institute SB RAS, Yakutsk, Russia

Abstract. The purpose of the article is to consider the possibilities of the geophysical method in solving the problem of quantitative estimation of the strength of sedimentary rocks that form the basis of engineering structures at the Kyurgellakh station of the Amur-Yakutsk Railway located 572 km away from the town of Neryungri, which is an administrative center of southern Yakutia (Russia). The problem is solved using the method of geometric electromagnetic induction sounding and a new technique that explored the attenuation of the harmonic field induced by a vertical magnetic dipole in the inhomogeneous anisotropic geological medium at the frequencies of 1.125 and 0.281 MHz in the intermediate separation zone of 5–100 m. A comparative analysis has determined a good agreement in changes of geological and geophysical estimates of the average strength of laboratory water-saturated samples and sedimentary rock mass predicted in the same state at the comparable depth of 6–12 m. The measure of agreement when using the most adequate equation of the power function is high and equals 0.815 according to the normalized coefficient of multiple determination. This means that strength is the most important factor among the frozen ground characteristics affecting the electromagnetic field attenuation at the frequencies and spacing specified, contributing no less than 80 %. The tested geophysical method can thus correctly map the distribution boundaries of different strength sedimentary rocks. The crushed and fissured rocks with the strengths below 40–35 MPa are confined to the tectonic fractures of varying directions with a polygon-like structure. Geophysical data clearly delineate the structure at the depths of 12.3–27.5 m where predominate the rocks with high strengths (50–120 MPa). The geometric EM induction sounding is recommended to use at all stages of geotechnical investigations to map the development areas of southern Yakutia by rock strength classes.

Keywords: Kyurgellakh station, sedimentary rock mass, rocky-semi-rocky soils, strength, exploration, geometric electromagnetic (EM) induction sounding, depth

Funding: This budgetary financed research was performed at the Laboratory of Permafrost Engineering of Melnikov Permafrost Institute within the Basic Research Project of the Siberian Branch of the Russian Academy of Sciences “Sustainability of Natural and Engineering Systems in Permafrost Regions and Development of New Technologies for Using Permafrost Resources (Reg. ID AAAA-A20-120111690011-9).

Acknowledgements: The author is grateful to G.K. Suvorova, the former Chief Geophysicist at OAO “YuzhYakutTISIZ” for her valuable consultations on the geophysical works operation and to the late V.E. Nemtseva, the Geologist at AO “YakutTISIZ” for the perfect geological logging of borehole cores.

For citation: Neradovskii L.G. Mapping capabilities of geometric EM induction sounding in southern Yakutia permafrost. *Nauki o Zemle i nedropol'zovanie = Earth sciences and subsoil use*. 2023;46(3):270-281. (In Russ.). <https://doi.org/10.21285/2686-9993-2023-46-3-270-281>. EDN: SPMFDZ.

Введение

Известно, что результаты применения в геологии методов геофизики оцениваются в первую очередь визуально по относительной пространственной (площади, глубине) или временной изменчивости исследуемых характеристик. Затем начинается обработка фактического материала математическими методами. Цель настоящего исследования заключалась в иллюстрации картировочных возможностей редко применяемого в настоящее время метода дистанционного индуктивного зондирования (ДИЗ) на примере решения за-

дачи вероятностной оценки прочности мерзлых скально-полускальных грунтов. Решение такого типа задач методами геофизики настолько востребовано в современной реальности, что известный исследователь Южной Якутии Н.Н. Гриб отнес их к важнейшим задачам геомеханики [1]. Результат решения представленной задачи показан в сравнении геолого-геофизических изображений динамики прочности мерзлых осадочных пород на одном из объектов инженерно-строительных изысканий Южной Якутии. Со стороны геологии сравнивалось изображение изменчивости



прочности, построенное по данным буровых и лабораторных работ, а со стороны геофизики – аналогичное изображение, построенное по данным ДИЗ с применением технологии изучения затухания гармонического высокочастотного поля вертикального магнитного диполя (ВВМД) [2]. Эта инновационная технология не применялась ни в России, ни за рубежом. Категоричность такого заявления рождена в результате многолетнего поиска и анализа публикаций в разных источниках¹. Начиная с 60-х гг. прошлого века в них не было найдено ни одного даже поверхностного упоминания метода ДИЗ, изучавшего затухание поля ВВМД. Перечислим авторитетные источники. Среди них выделим работы выдающегося ленинградского ученого-геофизика А.В. Вешева. К ним прибавим работу украинского геофизика М.И. Задегироговы [3], обзорную работу красноярских геофизиков В.И. Иголкина и др. [4], информацию с сайта Института геофизики им. Ю.П. Булашевича УрО РАН². Отдельно выделим работу сотрудника этого института В.А. Давыдова³ [5]. Наконец, остановимся в изучении источников на документе высокого государственного статуса – инструкции по электроразведке Министерства геологии СССР.

Зарубежный опыт применения ДИЗ в числе других методов индуктивной геоэлектрики с общим названием ЕМІ (*англ.*: electromagnetic induction) мало в чем отличается от отечественного опыта. Объединяет этот интернациональный опыт полное молчание о применении технологии изучения затухания поля ВВМД. Начиная с конца 70-х гг. прошлого века зарубежные геофизики изучали и по сей день продолжают изучать в килогерцовом диапазоне частот электропроводимость почвогрунтов и пород, чаще всего с аппаратурой ЕМ-31

и ЕМ-38 [6]. О приверженности к классическому подходу изучения электропроводимости методами ЕМІ пишут Дж.А. Дулиттл, Э.К. Бревик [7]. Лишь в отдельных ранних работах, например в работе А. Сарторелли, Р. Френча [8] и техническом отчете департамента транспорта и госучреждений штата Аляска⁴ со ссылкой на работу Дж.Д. Макнила, обращено внимание на затухание как на суммарный индуктивный отклик от слоев нижнего полупространства. Однако сделано это опять же в контексте изучения электропроводимости без прямого изучения затухания низкочастотных полей в неоднородной анизотропной геологической среде.

Материалы и методы исследования

Геомеханические исследования выполнены в ретроспективном порядке по данным инженерно-геологических изысканий, полученным в 1990–1991 гг. на площадке проектируемого поселка станции «Кюргеллях». Станция расположена по Амуро-Якутской железнодорожной магистрали в 572 км от административного центра Южной Якутии г. Нерюнгри на северо-восток в сторону столицы Республики Саха (Якутия) г. Якутска. Геоморфологически станция находится на водоразделе руч. Орто-Тала и Аччыгый-Тала на высоте 513–529 м. На станции пробурено 25 скважин до глубины 10–12 м. По данным буровых работ, основание станции сложено мерзлыми нижнекембрийскими осадочными карбонатными породами (доломитами, известняками). Сверху породы покрыты слоем четвертичного делювия – элювия (суглинками с дресвой, гравием) мощностью 0,4–2,1 м. Палеозойский элювий состоит из плотных ярко-красных и желтых песчаных глин и встречается на участках

¹ Автор настоящей статьи будет весьма признателен, если среди читающих эту статью найдется кто-нибудь, кто опровергнет это заявление.

² История // Уральское отделение Российской академии наук. Институт геофизики имени Ю.П. Булашевича [Электронный ресурс]. URL: <http://igfuran.ru/struktura/laboratoriya-ekologicheskoy-geofiziki/istoriya> (19.05.2023).

³ В этой работе изучены возможности метода дистанционного индуктивного зондирования в сравнении с сейсмическим методом преломленных волн и современным методом электротомографии. Автор работы убежден, что возможности метода дистанционного индуктивного зондирования далеко не исчерпаны, но при этом не упоминает, что среди этих возможностей есть технология изучения затухания гармонического электромагнитного поля на высокой частоте.

⁴ Technical Note TN-8. EM34-3 survey interpretation techniques / J.D. McNeill. Ontario: Geonics Limited, 1980. 17 p. [Электронный ресурс]. URL: <http://geonics.com/pdfs/technicalnotes/tn8.pdf> (19.05.2023).



распространения тектонических разрывных нарушений до глубины 4,5–8,6 м и более.

Прочность осадочных пород изучена изыскательскими работами на глубине 0,8–11 м. По монолитам отобранных из керна скважин в лаборатории изготавливалось несколько образцов и по ним с надежностью 80 % определялись средние значения R_c – временного предела прочности на одноосное сжатие в воздушно-сухом и водонасыщенном состоянии⁵. Эта характеристика давно и широко применяется при изучении скально-полускальных грунтов в отечественном грунтоведении и зарубежной геотехнике. Из современных зарубежных публикаций в качестве типичного примера достаточно сослаться на работу, в которой характеристика R_c применялась вместе с горно-геологическими и техническими характеристиками при построении нейронной модели множественной регрессии с целью решения задачи прогноза скорости проходки буровых скважин с алмазным долотом на месторождениях Турции [9].

Метод ДИЗ выполнялся с применением аппаратуры среднечастотного электромагнитного зондирования (СЭМЗ), разработанной в НПО «Сибцветметавтоматика» (г. Красноярск) в 1991 г.⁶ В пяти параметрических точках скважин⁷ были измерены в четырех азимутах⁸ в интервале разности⁹ 5–100 м все составляющие поля ВВМД. Это вертикальная (H_z), горизонтальная (H_r) составляющие поля ВВМД, а также большая и малая оси эллипса поляризации и угол наклона большой оси к горизонту. Измерения сделаны на всех четырех высоких частотах, которые предоставляет аппаратура СЭМЗ (2,25, 1,125, 0,562, 0,281 МГц). В остальных случаях на всех скважинах измерялись только H_z и H_r . На стадии ретроспективного анализа данных метода ДИЗ, полу-

ченных на параметрических точках скважин, по альбому палеток¹⁰ и таблице из работы В.И. Иголкина и др. [4] были решены две задачи. Первая наиболее сложная задача – оценка эффективных значений электрофизических характеристик¹¹ осадочных пород. Вторая задача – определение по этим характеристикам эффективной глубины проникновения поля ВВМД в массив осадочных пород. Решение задач показало, что прочность пород лучше всего изучать на частоте 1,125 и 0,281 МГц. На первой частоте прочность изучается на глубине 6,5–11,7 м, а на второй – на глубине 12,3–27,5 м. Первая глубина совпадает с интервалом изыскательского опробования прочности пород в их наиболее изученной части на глубине 6–11 м. Вторая глубина охватывает границы структурной консолидации пород за пределами древней коры выветривания. Такая особенность применения метода ДИЗ создает благоприятные условия не только для корректного сопоставления геолого-геофизических значений R_c массива осадочных пород, но и для прогноза их изменения за пределами сопоставления, где вероятностная оценка прочности по затуханию поля ВВМД освобождается от сильного маскирующего влияния глинистого материала слоя делювиально-элювиальных отложений.

В отличие от изысканий, вероятностные оценки R_c определялись по модели г. Нерюнгри [10] с использованием модифицированного регрессионного уравнения степенной функции [11]. Входными данными для уравнения служили средние азимутальные значения коэффициента k . Именно по ним оценивалась интегральная мера затухания поля ВВМД в неоднородных по строению и изменчивых по составу, температуре и прочности осадочных породах. Значения k определялись путем их

⁵ ГОСТ 21135.2-84. Породы горные. Методы определения предела прочности при одноосном сжатии. М.: Изд-во стандартов, 1984. 7 с.

⁶ Комплекс среднечастотной аппаратуры электромагнитного зондирования. Техническое описание. Красноярск: НПО «Сибцветметавтоматика» СССР, 1991. 30 с.

⁷ Точки расположены по углам и центру площадки станции размером 600×600 м².

⁸ Юг – север, восток – запад.

⁹ Расстояние между излучающей и приемной антеннами.

¹⁰ Лебедев В.Ф., Онущенко В.И., Литвинцева Л.М. Комплекс СЭМЗ: метод. пособие. Красноярск: НПО «Сибцветметавтоматика», 1991. 83 с.

¹¹ Вещественная часть относительной комплексной диэлектрической проницаемости (далее – проницаемость) и электрического сопротивления (далее – сопротивление).



приравнивания к значениям показателя степенной функции, которая описывала в заданном азимуте на частоте 1,125 и 0,281 МГц закономерное уменьшение значений H_z при увеличении разности.

Практический опыт свидетельствует, что в отличие от экспоненциальной функции, применяемой в теории электродинамики [12] при изучении идеализированных однородных изотропных геологических сред, степенная функция более корректно описывает процесс затухания поля ВВМД в реальных неоднородных анизотропных средах, в частности в изучаемых мерзлых осадочных породах.

Результаты исследования

В ходе исследования сравнивались результаты определений средних значений прочности, полученных по данным изысканий и метода ДИЗ. Сравнение производилось для наиболее неблагоприятных условий строительства и эксплуатации инженерных сооружений, то есть по значениям прочности лабораторных образцов, насыщенных водой, и массива осадочных пород в прогнозируемом водонасыщенном состоянии. Такое допущение перехода из мерзлого низкотемпературного состояния (температура ниже $-1\text{ }^{\circ}\text{C}$) или воздушно-сухого высокотемпературного морозного состояния (температура около $0 - -0,1...-0,5\text{ }^{\circ}\text{C}$) предусматривает влияние антропогенно-техногенных факторов на фоне продолжающегося потепления климата с уже замедленным, но все же повышением среднегодовой температуры приземного слоя воздуха в криолитозоне Якутии [13–15].

Ради уменьшения действия масштабного фактора [16] и максимально возможного сближения точечных геологических и объемных геофизических оценок прочности первые дополнительно усреднялись. Делалось это по инженерно-геологическим элементам (ИГЭ) с учетом установленной по паспортам скважин и интерполируемой по линиям разрезов между скважинами мощности блоков осадочных пород разной степени трещиноватости. Эта

сложная и зачастую ручная длительная интеллектуальная работа сделана геологами-изыскателями на стадии составления технического отчета в соответствии с правилами и требованиями ГОСТ 20522-96¹². Важно отметить, что понятие ИГЭ впервые предложил Н.В. Коломенский. Об этом малоизвестном факте свидетельствуют его работы¹³ [17], а также монография В.А. Королёва и В.Т. Трофимова [18, с. 30] без уточнения того, в каком году было введено понятие ИГЭ. По просьбе автора настоящей статьи В.А. Королёв сделал уточнение, написав в личной переписке: «Н.В. Коломенский впервые опубликовал свои соображения по выделению ИГЭ в 1956 г. в учебнике “Инженерная геология”, вышедшем в двух томах. Эти соображения изложены им во втором томе учебника (разд. 2, гл. 2, с. 212–307). В примечании к этой главе написано, что “глава 2 составлена совместно с И.С. Комаровым”. Так что формально авторство выделения ИГЭ должно быть признано за этими двумя авторами». Как бы там ни было, точно известно, что применение ИГЭ в практике инженерной геологии и инженерно-строительных изысканий началось гораздо позже предложения Н.В. Коломенского и И.С. Комарова. Этому способствовало официальное утверждение сначала ГОСТ 20522-75, а затем ГОСТ 20522-96. В обновленном варианте эти документы заменены на ГОСТ 20522-2012.

Геолого-геофизическая изменчивость средних значений R_c массива осадочных пород на территории жилого поселка станции «Кюргеллях» показана в тоновом изображении, построенном с помощью программы «Сурфер-8». Интерполяция значений R_c выполнена способом Radial Basis Function. Этот способ сохраняет локальные особенности изменчивости прочности в некоторой окрестности с автоматически задаваемым программой радиусом взаимной интерполяции между точками скважин и ДИЗ.

Согласно данным изысканий, в исходном изображении изменчивости прочности (рис.

¹² ГОСТ 20522-96. Грунты. Методы статистической обработки результатов испытаний. М.: Изд-во стандартов, 1997. 24 с.

¹³ Коломенский Н.В. Общая методика инженерно-геологических исследований: учебник для вузов. М.: Недра, 1968. 324 с.



1, а) наблюдается полигональная структура тектонических разрывных нарушений в виде чередования линейных полос разной ориентации, близкой к взаимно перпендикулярной юго-восточной и западно-восточной ориентации.

В разрывных нарушениях осадочные породы в разной степени нарушены и ослаблены и находятся в дробленном и / или трещиноватом состоянии с прочностью ниже 40–35 МПа (участки зеленого цвета). Лишь в единичном случае в границах четко локализованного овального участка красного цвета породы находятся в разрушенном малопропрочном состоянии с прочностью меньше 15 МПа. Такие же три участка, но с повышенной граничной прочностью около 15 МПа наблюдаются в юго-западной и северо-западной части площадки в полосах зеленого цвета. В породах, вмещающих тектонические зоны дробления и трещиноватости (участки голубого и синего цвета), прочность пород выше и составляет около 40–50 МПа. Эти значения можно рассматривать как фон, означающий общую среднюю прочность для всей станции. На этом фоне видны фрагменты серо-черного цвета, которые представляют собой сохра-

нившиеся останцы наиболее крепких скальных осадочных пород со значением прочности 50–65 МПа. На одном из останцов (участок лазурного цвета в нижней части рис. 1, а) прочность достигает 65–75 МПа.

В сравнении с точечными данными изысканий (см. рис. 1, а) полигональная структура тектонической природы сохраняется и по объемным данным метода ДИЗ (см. рис. 1, б), но становится не такой отчетливой из-за перераспределения прочности в сторону общего ее повышения. В этой динамике с появлением в верхней части изображения расширенного разветвленного на три части участка крепких скальных пород (участка серо-черного цвета) остальные детали прочностной картины в целом сохраняются.

Изменение прочности осадочных пород на площадке жилого поселка станции «Кюргеллях» на глубине 6–12 м согласовано между данными изысканий и метода ДИЗ. Мера согласия высока и оценивается по приведенному значению коэффициента множественной детерминации, равному 0,815. Это означает¹⁴, что фактор прочности доминирует среди всех остальных мерзлотно-грунтовых факторов и оказывает равное влияние как на

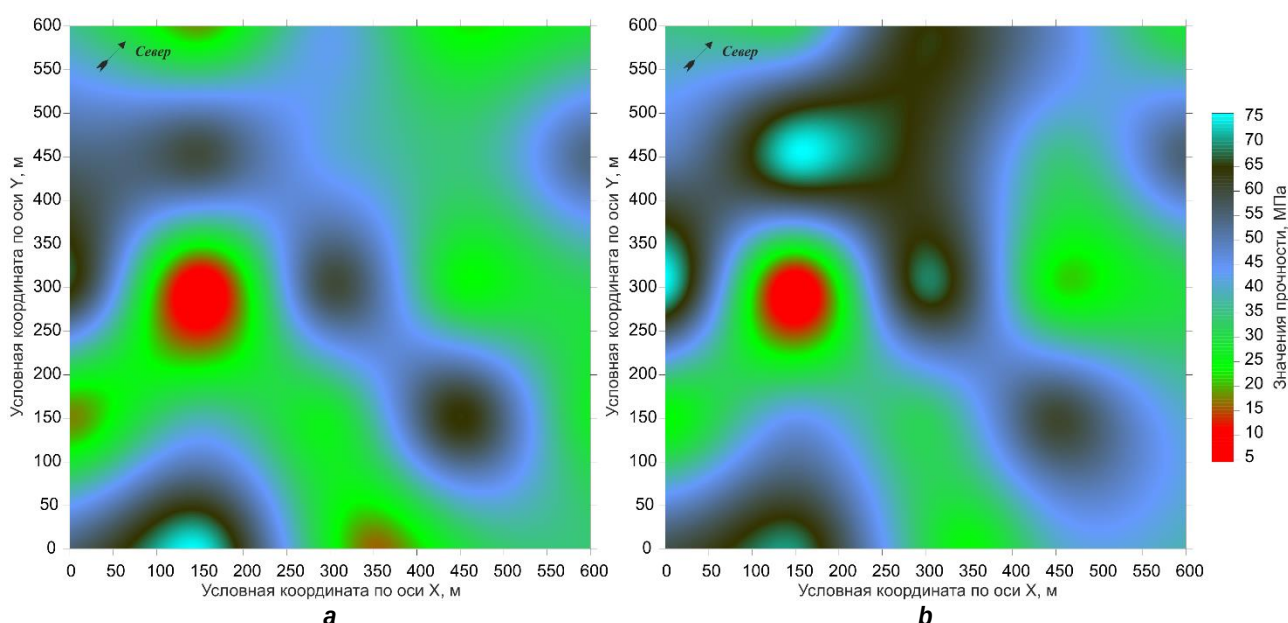


Рис. 1. Динамика прочности осадочных пород в 1990–1991 гг. на сопоставимой глубине опробования 6–12 м по данным изысканий (а) и метода дистанционного индуктивного зондирования (б)

Fig. 1. Dynamics of sedimentary rock strength in 1990–1991 at the comparable sampling depth of 6–12 m based on geotechnical site investigation (a) and geometric EM induction sounding (b)

¹⁴ Кулаичев А.П. Методы и средства комплексного анализа данных: учеб. пособие. М.: Форум: ИНФРА-М, 2017. 484 с.



лабораторную оценку прочности водонасыщенных образцов осадочных пород, так и на натурную геофизическую вероятностную оценку прочности массива пород в прогнозном водонасыщенном состоянии¹⁵. Доля этого влияния составляет не меньше 80 %. Этот факт есть не местная случайность, а природная закономерность, наблюдаемая в частном порядке. Она заключена и выражается в факторе прочности как интегральном показателе механических свойств осадочных и других пород с кристаллизационно-структурными связями.

Именно мера прочности, выражаемая в значениях R_c или другой характеристики, является собой итоговый объединяющий результат иерархического влияния всех остальных показателей состава, свойств и состояния пород на разномасштабных системных этапах. Такой же универсальной интегральной характеристикой, но уже со стороны электродинамики, служит удельное электрическое сопротивление почвогрунтов и пород. Вместе с диэлектрической проницаемостью оно регулирует затухание высокочастотных электромагнитных полей, в частности гармонического поля ВВМД. В отмеченном объединяющем пространстве подчинения и взаимоотношения и образуется «мостик» физических предпосылок для применения метода ДИЗ и других методов геоэлектрики на постоянном и переменном токе, в том числе методов георадиолокации и электротомографии.

После небольшого экскурса вернемся к рассмотрению результатов сравнительного анализа геолого-геофизических данных по прочности осадочных пород на площадке жилого поселка станции «Кюргеллях».

Переход в пространство проектно-строительной и инженерно-геологической категорий прочности скально-полускальных грунтов¹⁶ сопровождается кардинальной перестройкой изображения изменчивости прочности массива осадочных пород на сопоставимой глубине сравнения 6–12 м (рис. 2). Сохраняя черты полигональной тектонической структуры, изображение становится мозаичным и

предельно понятным геологам и проектировщикам как совместный результат геолого-геофизического ретроспективного районирования рассматриваемой территории, полученный на стадии проекта для периода изыскательских работ 1990–1991 гг. На изображении, построенном по данным изысканий (см. рис. 2, а) и данным метода ДИЗ (см. рис. 2, б), красным цветом обозначен потенциально опасный по просадкам основания и деформируемости конструкций инженерных сооружений овалыный участок полускальных грунтов малой прочности (ниже 15 МПа) размером около 50 м. Серовато-синим и темно-синим цветами на рис. 2 выделены устойчивые участки скальных грунтов средней категории прочности (15–50 МПа) и прочной категории (50–120 МПа) соответственно.

В целом на изученной территории, и по данным изысканий, и по данным метода ДИЗ, основание инженерных сооружений сложено на глубине 6–12 м скальными грунтами. Среди них, согласно данным изысканий, лишь в одном случае (вероятность 4 %) встречаются полускальные грунты, относящиеся к малопрочной категории. Это участок красного цвета на рис. 2, а. В остальных случаях на долю грунтов средней категории прочности (светло-серый цвет) и прочной категории (темно-синий цвет) приходится 64 и 32 % со средними значениями R_c , равными 36,87 и 66,76 МПа соответственно. По данным метода ДИЗ (см. рис. 2, б), на отмеченной глубине практически ничего не изменилось в долевом соотношении и по показателю средней прочности грунтов:

- грунты малопрочной категории – 4 % с $R_c = 5,1$ МПа;
- грунты средней категории прочности – 60 % с $R_c = 35,03$ МПа;
- грунты прочной категории – 36 % с $R_c = 35,78$ МПа.

Изменения прочности осадочных пород на глубине 12,3–27,5 м (рис. 3) становятся, по данным метода ДИЗ, более регулярными и предсказуемыми в сравнении с изменениями на глубине 6,5–11,7 м, но не самостоятель-

¹⁵ В реальности массив осадочных пород находится в мерзлом льдистом или морозном воздушно-сухом состоянии.

¹⁶ ГОСТ 25100-2020. Грунты. Классификация. М.: Стандартиформ, 2020. 38 с.



ными. По принципу генетической наследственности или преемственности, который нередко в геологии образно называют принципом «вершков и корешков», зональные изменения по глубине прочности любого массива пород, и в частности осадочных пород, закономерно передаются сверху вниз, постепенно ослабе-

вая в этом направлении. Объясняется эта природная закономерность снижением при увеличении глубины нивелирующего влияния экзогенных процессов [19] на прочность массива осадочных пород, и в том числе мощного по своей разрушительной силе процесса криогенного метаморфизма [20, 21].

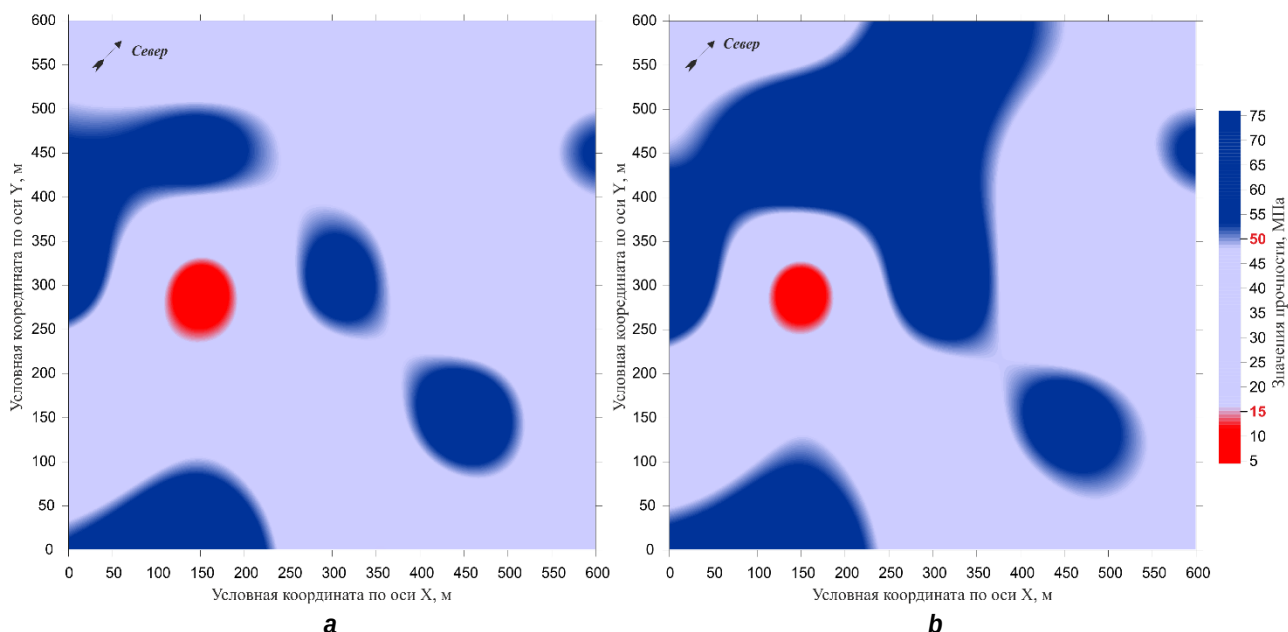


Рис. 2. Прочность осадочных пород в 1990–1991 гг. по категориям ГОСТ 25100-2020 на сопоставимой глубине опробования 6–12 м по данным изысканий (а) и метода дистанционного индуктивного зондирования (б)

Fig. 2. Sedimentary rock strength in 1990–1991 by GOST 25100-2020 classes at the comparable sampling depth of 6–12 m based on geotechnical site investigation (a) and geometric EM induction sounding (b)

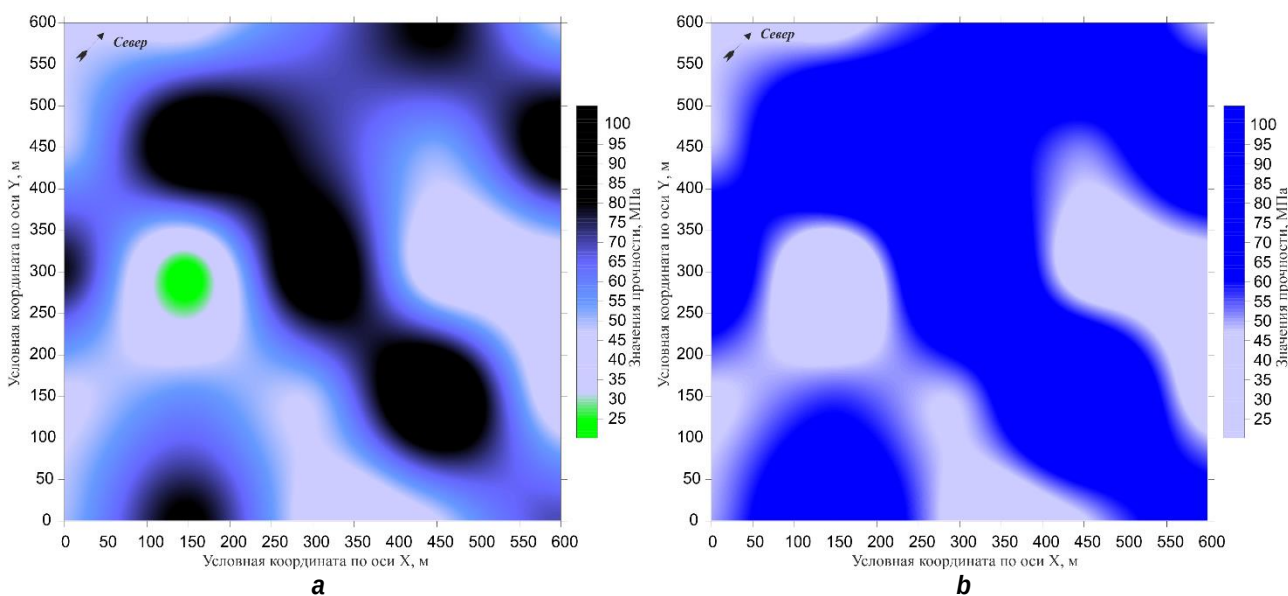


Рис. 3. Динамика прочности осадочных пород в 1990–1991 гг. по данным метода дистанционного индуктивного зондирования на глубине 12,3–27,5 м в исходном виде (а) и по категориям ГОСТ 25100-2020 (б)

Fig. 3. Dynamics of sedimentary rock strength in 1990–1991 based on geometric EM induction sounding at the depth of 12.3–27.5 m: original form (a) and by GOST 25100-2020 classes (b)



В рассматриваемом случае прирост глубины на 15–16 м ослабил связь, но не настолько, чтобы полностью потерять возможность при необходимости решать задачу прогноза прочности по данным метода ДИЗ¹⁷: прямую задачу с определением прочности на глубине 12,3–25,7 м, а обратную задачу – на глубине 6,5–11,7 м. Экономическая выгода такого информационного подхода состоит в сокращении времени и стоимости производства работ методом ДИЗ, так как по измерениям только на частоте 1,125 МГц можно изучить прочность массива осадочных пород на глубине 6,5–11,7 м, а затем сделать пересчет на глубину 12,3–25,7 м. Применение частоты 0,281 МГц изменяет порядок изучения прочности на обратный – снизу вверх. Благодаря снижению влияния разрушительных факторов (воды, ветра, температуры) фон прочности на глубине 12,3–27,5 м вырос до 59,47 МПа, то есть в 1,34 раза по сравнению с фоном прочности на глубине 6,5–11,7 м. Вместе с этим в изображении изменчивости прочности пород на сравнительно большой глубине стали проявляться в очищенном отфильтрованном виде черты реликтовой полигональной тектонической структуры (см. рис. 3, а).

В упорядоченном генерализованном пространстве категорий ГОСТ 25100-2020 переход на глубину 12,3–27,5 м сопровождается существенным перераспределением прочности осадочных пород (см. рис. 3, б). Причем – и это необходимо еще раз повторить – в предсказуемом пространстве категорий гораздо проще принимать правильные решения по вопросам инженерно-геологического районирования застраиваемых территорий и вопросам проектирования по размещению на этих территориях инженерных сооружений с благоприятными условиями. Действительно, одного взгляда (см. рис. 3, б) достаточно, чтобы правильно выбрать участок строительства

наиболее ответственного здания, например государственной районной электростанции, чтобы затем построить его на скальном основании с максимальной прочностью. По данным метода ДИЗ, такие благоприятные участки строительства (синий цвет) со средними значениями R_c от 50 до 104,8 МПа занимают большую часть площадки жилого поселка станции «Кюргеллях». Добавим, что в реальном морозном воздушно-сухом состоянии прочность массива осадочных пород будет выше¹⁸ примерно на 30–40 %.

Заключение

Исследования на станции «Кюргеллях» доказали возможности метода ДИЗ в решении задач геомеханики и инженерно-геологического районирования по категории прочности скально-полускальных грунтов в Южной Якутии. Апробация метода ДИЗ удостоверяет, что при допущении прогнозного сценария перехода мерзлых осадочных пород в водонасыщенное состояние из-за влияния климатических и техногенных факторов породы по-прежнему остаются скальным основанием инженерных сооружений, построенных и эксплуатируемых на станции. На изученной в 1990–1991 гг. инженерно-геологическими изысканиями и методом ДИЗ сопоставимой глубине 6–12 м массив осадочных пород в большинстве случаев относится к категории средней прочности (15–50 МПа). Ниже, на глубине 12,3–27,5 м, согласно данным метода ДИЗ, доминируют породы прочной категории (50–120 МПа). Полученные результаты подтверждают мнение В.А. Давыдова о том, что возможности метода ДИЗ еще далеко не исчерпаны [5]. Именно в этом аспекте нужно возрождать на современном техническом уровне устаревший метод ДИЗ и включать его в индустрию строительства и горного дела наравне с методами георадиолокации и электротомографии.

Список источников

1. Грив Н.Н., Самохин А.В. Физико-механические свойства углевмещающих пород Южно-Якутского бассейна / отв. ред. Г.И. Кулаков. Новосибирск: Наука, 1999. 236 с.

¹⁷ По приведенному значению коэффициента множественной детерминации мера согласованной изменчивости прочности на глубине 6,5–11,7 и 12,3–27,5 м равна 0,657 [16].

¹⁸ Пособие по проектированию оснований зданий и сооружений (к СНиП 2.02.01-83). М.: Стройиздат, 1986. 415 с. (таблица 115).



2. Нерадовский Л.Г. Изучение прочности оснований инженерных сооружений по затуханию электромагнитного поля в г. Нерюнгри // *Инновации*. 2022. № 4. С. 63–74. <https://doi.org/10.26310/2071-3010.2022.282.4.010>. EDN: VGASFK.
3. Задегиголова М.М. Радиоволновой метод в инженерной геологии и геоэкологии: монография. М.: МГУ, 1998. 320 с.
4. Иголкин В.И., Шайдунов Г.Я., Тронин О.А., Хохлов М.Ф. Методы и аппаратура электроразведки на переменном токе. Красноярск: СФУ, 2016. 272 с.
5. Давыдов В.А. Двумерная инверсия дистанционных индукционных зондирований // *Вопросы естествознания*. 2018. № 1. С. 62–69. EDN: QXVBGP.
6. Boaga J. The use of FDEM in hydrogeophysics: a review // *Journal of Applied Geophysics*. 2017. Vol. 139. P. 36–46. <https://doi.org/10.1016/j.jappgeo.2017.02.011>.
7. Doolittle J.A., Brevik E.C. The use of electromagnetic induction techniques in soils studies // *Geoderma*. 2014. Vol. 223–225. P. 33–45. <https://doi.org/10.1016/j.geoderma.2014.01.027>.
8. Sartorelli A.N., French R.B. Electro-magnetic induction methods for mapping permafrost along northern pipeline corridors // *Geophysics and Subsea Permafrost: Proc. 4th Can. Permafrost Conf.* 1982. P. 283–295.
9. Basarir H., Tutluoglu L., Karpuz C. Penetration rate prediction for diamond bit drilling by adaptive neuro-fuzzy inference system and multiple regressions // *Engineering Geology*. 2014. Vol. 173. P. 1–9. <https://doi.org/10.1016/j.enggeo.2014.02.006>.
10. Нерадовский Л.Г. Вероятностная модель прогноза прочности песчаников методом дистанционного индуктивного зондирования в криолитозоне Южной Якутии (на примере г. Нерюнгри) // *Криосфера Земли*. 2022. Т. 26. № 6. С. 43–57. <https://doi.org/10.15372/KZ20220605>. EDN: SJTDBR.
11. Нерадовский Л.Г. Оценка прочностного состояния скально-полускального основания инженерных сооружений г. Нерюнгри в криолитозоне Южной Якутии по данным геофизики (метода дистанционного индуктивного зондирования) // *Недропользование XXI век*. 2022. № 4. С. 91–97. EDN: GYJQML.
12. Светов Б.С. Основы геоэлектрики. М.: ЛКИ, 2008. 656 с.
13. Варламов С.П., Скачков Ю.Б., Скрыбин П.Н. Мониторинг теплового режима грунтов Центральной Якутии. Якутск: ИМЗ СО РАН, 2021. 155 с.
14. Шац М.М., Скачков Ю.Б. К дискуссии об основных тенденциях изменения климата Севера // *Климат и природа*. 2020. № 2. С. 3–18. EDN: PNLONU.
15. Скачков Ю.Б., Нерадовский Л.Г. Прогноз изменения температуры воздуха в Якутии до середины XXI века // *Ресурсы и риски регионов с вечной мерзлотой в меняющемся мире: сб. тр. X Междунар. конф. по мерзлотоведению ТИОСР. (г. Салехард, 25–29 июня 2012 г.)*. Салехард: Печатник, 2012. Т. 3. С. 471–474. EDN: VSJKXN.
16. Необутов Г.П. Влияние масштабного фактора на прочность льдопородного материала // *Горный информационно-аналитический бюллетень*. 2012. № 2. С. 22–27. EDN: PVLNUJ.
17. Коломенский Н.В. Некоторые проблемы развития инженерной геологии // *Пути дальнейшего развития инженерной геологии: материалы дискуссии 1-го Междунар. конгресса по инженерной геологии*. М., 1971. С. 36–40.
18. Королёв В.А., Трофимов В.Т. Инженерная геология: история, методология и номологические основы: монография. М.: КДУ, 2016. 292 с.
19. Ярз Л.А. Методы инженерно-геологических исследований процесса и кор выветривания. М.: Недра, 1991. 139 с.
20. Мельников А.Е., Павлов С.С., Колодезников И.И. Разрушение пород насыпи новой железнодорожной линии Томмот-Кердем Амуро-Якутской магистрали под воздействием криогенного выветривания // *Современные проблемы науки и образования*. 2014. № 2. [Электронный ресурс]. URL: <https://science-education.ru/ru/article/view?id=12945> (06.02.2022). EDN: SBWMQZ.
21. Забелин А.В. Количественная оценка влияния процессов криогенного выветривания на устойчивость откосов бортов угольных карьеров Южной Якутии // *Горный информационно-аналитический бюллетень*. 2003. № 7. С. 11–13. EDN: KXFGGJ.

References

1. Grib N.N., Samokhin A.V. *Physical and mechanical properties of coal-bearing rocks in the South Yakutsk basin*. Novosibirsk: Nauka; 1999, 236 p. (In Russ.).
2. Neradovskii L.G. Study of the strength of the foundations of engineering structures for the attenuation of the electromagnetic field in the city of Neryungri. *Innovatsii = Innovations*. 2022;4:63-74. (In Russ.). <https://doi.org/10.26310/2071-3010.2022.282.4.010>. EDN: VGASFK.
3. Zaderigolova M.M. *Radio wave method in engineering and geoecology*. Moscow: Lomonosov Moscow State University; 1998, 320 p. (In Russ.).
4. Igolkin V.I., Shaidurov G.Ya., Tronin O.A., Khokhlov M.F. *Methods and AC equipment for electromagnetic prospecting*. Krasnoyarsk: Siberian Federal University; 2016, 272 p. (In Russ.).



5. Davydov V.A. Two-dimensional inversion of remote induction sounding. *Voprosy estestvoznaniya*. 2018;1:62-69. (In Russ.). EDN: XQXBGP.
6. Boaga J. The use of FDEM in hydrogeophysics: a review. *Journal of Applied Geophysics*. 2017;139:36-46. <https://doi.org/10.1016/j.jappgeo.2017.02.011>.
7. Doolittle J.A., Brevik E.C. The use of electromagnetic induction techniques in soils studies. *Geoderma*. 2014;223-225:33-45. <https://doi.org/10.1016/j.geoderma.2014.01.027>.
8. Sartorelli A.N., French R.B. Electro-magnetic induction methods for mapping permafrost along northern pipeline corridors. *Geophysics and Subsea Permafrost: Proc. 4th Can. Permafrost Conf.* 1982: 283-295.
9. Basarir H., Tutluoglu L., Karpuz C. Penetration rate prediction for diamond bit drilling by adaptive neuro-fuzzy inference system and multiple regressions. *Engineering Geology*. 2014;173:1-9. <https://doi.org/10.1016/j.enggeo.2014.02.006>.
10. Neradovskii L.G. A probabilistic model for predicting sandstone strength using electromagnetic induction sounding in the Southern Yakutian permafrost region: a case study in Neryungri. *Kriosfera Zemli = Earth's Cryosphere*. 2022;26(6): 43-57. (In Russ.). <https://doi.org/10.15372/KZ20220605>. EDN: SJTDBR.
11. Neradovskii L.G. Assessment of the strength state of the rocky-semi-rocky foundation of engineering structures in the city of Neryungri in the permafrost zone of South Yakutia according to geophysics data (remote inductive sensing method). *Nedropol'zovanie XXI vek*. 2022;4:91-97. (In Russ.). EDN: GYJQML.
12. Svetov B.S. *Fundamentals of geoelectrics*. Moscow: LKI; 2008, 656 p. (In Russ.).
13. Varlamov S.P., Skachkov Yu.B., Skryabin P.N. *Monitoring of soil thermal regime in Central Yakutia*. Yakutsk: Melnikov Permafrost Institute SB RAS; 2021, 155 p. (In Russ.).
14. Shatz M.M., Skachkov Yu.B. To discussion on the basic trends of climate change of the North. *Klimat i priroda*. 2020;2:3-18. (In Russ.). EDN: PNLNU.
15. Skachkov Yu.B., Neradovskii L.G. Forecast of air temperature changes in Yakutia until middle of the 21st century. In: *Resursy i riski regionov s vечноi merzlotoi v menyayushchetsya mire: sb. tr. X Mezhdunar. konf. po merzloto-vedeniyu TICOP = Resources and risks of permafrost regions in a changing world: collected papers of the 10th International conference on permafrost TICOP*. 25–29 June 2012, Salekhard. Salekhard: Pechatnik; 2012, vol. 3, p. 471-474. (In Russ.). EDN: VSJKXN.
16. Neobutov G.P. The influence of large-scale factor for strength of ice-rock filling. *Gornyi informatsionno-analiticheskii byulleten' = Mining informational and analytical bulletin*. 2012;2:22-27. (In Russ.). EDN: PVLNUJ.
17. Kolomenskii N.V. Some problems of engineering geology development. In: *Puti dal'neishego razvitiya inzhenernoi geologii: materialy diskussii 1-go Mezhdunar. kongressa po inzhenernoi geologii = Further development trends of engineering geology: discussion materials of the 1st International Congress on Engineering Geology*. Moscow; 1971, p. 36-40. (In Russ.).
18. Korolev V.A., Trofimov V.T. *Engineering geology: history, methodology and nomological foundations*. Moscow: KDU; 2016, 292 p. (In Russ.).
19. Yarg L.A. *Methods of engineering-geological studies of the weathering process and its crusts*. Moscow: Nedra; 1991, 139 p. (In Russ.).
20. Melnikov A.E., Pavlov S.S., Kolodeznikov I.I. Rock destruction of the body of railroad of the Tommot-Kerem Amur-Yakutsk new line under the influence of the frost weathering. *Sovremennye problemy nauki i obrazovaniya*. 2014;2. Available from: <https://science-education.ru/ru/article/view?id=12945> [Accessed 6th February 2022]. (In Russ.). EDN: SBWMQZ.
21. Zabelin A.V. Quantitative estimation of frost weathering effects on coal mine slope stability in Southern Yakutia. *Gornyi informatsionno-analiticheskii byulleten' = Mining informational and analytical bulletin*. 2003;7:11-13. EDN: KXFGGJ. (In Russ.).

Информация об авторе / Information about the author



Нерадовский Леонид Георгиевич,

старший научный сотрудник лаборатории инженерной геокриологии,
Институт мерзлотоведения им. П.И. Мельникова СО РАН,
г. Якутск, Россия,

✉ L031950N@ya.ru

РИНЦ Author ID: 394470

Scopus Author ID: 17344126100

Leonid G. Neradovskii,

Senior Researcher of the Laboratory of Engineering Geocryology,
Melnikov Permafrost Institute SB RAS,
Yakutsk, Russia,

✉ L031950N@ya.ru

RSCI Author ID: 394470

Scopus Author ID: 17344126100



Вклад автора / Contribution of the author

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

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

Конфликт интересов / Conflict of interests

Автор заявляет об отсутствии конфликта интересов.

The author declares no conflicts of interests.

Автор прочитал и одобрил окончательный вариант рукописи.

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

Информация о статье / Information about the article

Статья поступила в редакцию 08.08.2023; одобрена после рецензирования 24.08.2023; принята к публикации 11.09.2023.

The article was submitted 08.08.2023; approved after reviewing 24.08.2023; accepted for publication 11.09.2023.

ГЕОЛОГИЯ, ПОИСКИ И РАЗВЕДКА ТВЕРДЫХ
ПОЛЕЗНЫХ ИСКОПАЕМЫХ, МИНЕРАГЕНИЯ

Краткое сообщение

УДК 556.3.01.06:553.31

EDN: RAFZNQ

DOI: 10.21285/2686-9993-2023-46-3-282-288

Типизация гидрогеологических условий на месторождениях
полезных ископаемых методом системного анализаЛ.И. Аузина^а^аИркутский национальный исследовательский технический университет, г. Иркутск, Россия

Резюме. В работе представлен нестандартный подход к типизации месторождений полезных ископаемых Восточной Сибири (Россия) по гидрогеологическим обстановкам в условиях недостаточности и неравномерности исходной информации. Наиболее рационально решить эту задачу на начальных стадиях исследований путем выделения ряда легко определяемых косвенных показателей, обуславливающих выбор участков, перспективных для бурения гидрогеологических скважин. Автором использовался метод системного анализа, включающий два основных этапа: анализа и синтеза, в результате реализации которых исследуемые объекты типизировались в соответствии с поставленными задачами. Разработанная методика получила применение при структурно-гидрогеологическом районировании Илим-Ленского плато, к которому приурочены основные железорудные месторождения Восточной Сибири, типизации россыпных месторождений Ленского золоторудного района по степени сложности инженерно-гидрогеологических условий, при выделении участков повышенной водообильности на месторождениях нефтегазового комплекса Восточной Сибири и т. д.

Ключевые слова: гидрогеологические условия, месторождения Восточной Сибири, системный анализ, модель

Для цитирования: Аузина Л.И. Типизация гидрогеологических условий на месторождениях полезных ископаемых методом системного анализа // Науки о Земле и недропользование. 2023. Т. 46. № 3. С. 282–288. <https://doi.org/10.21285/2686-9993-2023-46-3-282-288>. EDN: RAFZNQ.

GEOLOGY, PROSPECTING AND EXPLORATION
OF SOLID MINERALS, MINERAGENCY

Brief report

Typification of hydrogeological conditions
in mineral deposits by system analysis methodLarisa I. Auzina^а^аIrkutsk National Research Technical University, Irkutsk, Russia

Abstract. The paper presents a non-standard approach to the typification of mineral deposits in Eastern Siberia (Russia) according to hydrogeological conditions under insufficiency and unevenness of the initial information. The most rational way to solve this problem at initial research stages is to identify a number of easily determined indirect indicators that determine the selection of sites promising for drilling hydrogeological wells. The author uses the method of system analysis including two main stages of analysis and synthesis, which result in the typification of the objects under study in accordance with the assigned tasks. The developed methodology is used for various purposes: structural hydrogeological zoning of the Ilim-Lena plateau with associated main iron ore deposits of Eastern Siberia, typification of alluvial deposits of the Lena gold ore region according to the complexity degree of engineering hydrogeological conditions, identification of the sites with high water abundance in the oil and gas fields of Eastern Siberia.

© Аузина Л.И., 2023



Keywords: hydrogeological conditions, deposits in Eastern Siberia, system analysis, model

For citation: Auzina L.I. Typification of hydrogeological conditions in mineral deposits by system analysis method. *Nauki o Zemle i nedropol'zovanie = Earth sciences and subsoil use*. 2023;46(3):282-288. (In Russ.). <https://doi.org/10.21285/2686-9993-2023-46-3-282-288>. EDN: RAFZNQ.

Введение

В условиях сложной структурно-тектонической обстановки, недостаточности и неравномерности геолого-гидрогеологической изученности, которые характерны для месторождений полезных ископаемых Восточной Сибири, значительные трудности возникают при схематизации природных условий, оптимизации видов и объемов гидрогеологических исследований. В этих случаях весьма эффективно применение метода системного анализа, главным инструментом которого является модель месторождения.

Под системным анализом понимается исследование реальных объектов и явлений с точки зрения системного подхода, состоящее из двух этапов: анализа и синтеза.

Разработанная для реализации поставленной задачи методика анализа данных базируется на методах многомерной статистики [1, 2].

Материалы и методы исследования

При превалировании качественных (описательных) признаков над количественными (коэффициентов фильтрации, водопроницаемости, уровне- и пьезопроводности, трещиноватости, дебита скважин и т. д., то есть показателей, которые оцениваются при бурении и опробовании гидрогеологических скважин и которые напрямую указывают на степень водообильности водовмещающих пород, но требуют достаточно больших финансовых, временных и трудовых затрат), что характерно для геолого-гидрогеологической информации месторождений полезных ископаемых Восточной Сибири, использовался эвристический алгоритм, включающий два основных этапа работы.

Первый этап (этап анализа) – обучение, в процессе которого создаются два файла:

F1 – файл, представляющий собой совокупность исходных данных по всем точкам объектов-эталонов (то есть участков, наиболее полно изученных в гидрогеологическом

отношении и имеющих максимум количественных показателей);

F2 – файл градаций, являющийся комплексом пронумерованных диапазонов изменений всех параметров.

В результате совместной работы файлов F1 и F2 создается файл F, в котором вся исходная информация представляется в индексированном виде по номерам градаций файла F2.

Заканчивается процесс обучения составлением классификационной таблицы объектов-эталонов (начало этапа синтеза).

Второй этап (окончание этапа синтеза) – распознавание или прогноз, то есть выявление принадлежности объектов-аналогов (слабо или вообще не охарактеризованных в гидрогеологическом отношении) к тому или иному классу, в результате чего объекты-аналоги типизируются.

Результаты исследования и их обсуждение

Описанная методика разрабатывалась и использовалась в процессе структурно-гидрогеологического районирования Илимско-Ленского плато, к которому приурочены основные железорудные месторождения Восточной Сибири, при типизации россыпных месторождений Ленского золоторудного района по степени сложности гидрогеологических условий, а также выделению участков повышенной водообильности на месторождениях нефтегазового комплекса Восточной Сибири.

Илимско-Ленское плато (тектоническая структура второго порядка), в пределах которого находится более 50 железорудных месторождений и рудопроявлений, расположено в центральной части Ангаро-Ленского краевого прогиба (структура первого порядка) (рис. 1). В распределении и формировании подземных вод региона ведущую роль играют геолого-структурные факторы, обусловившие различное положение разновозрастных толщ в пространстве, что привело к достаточно четкому разделению зон свободного и затруднен-

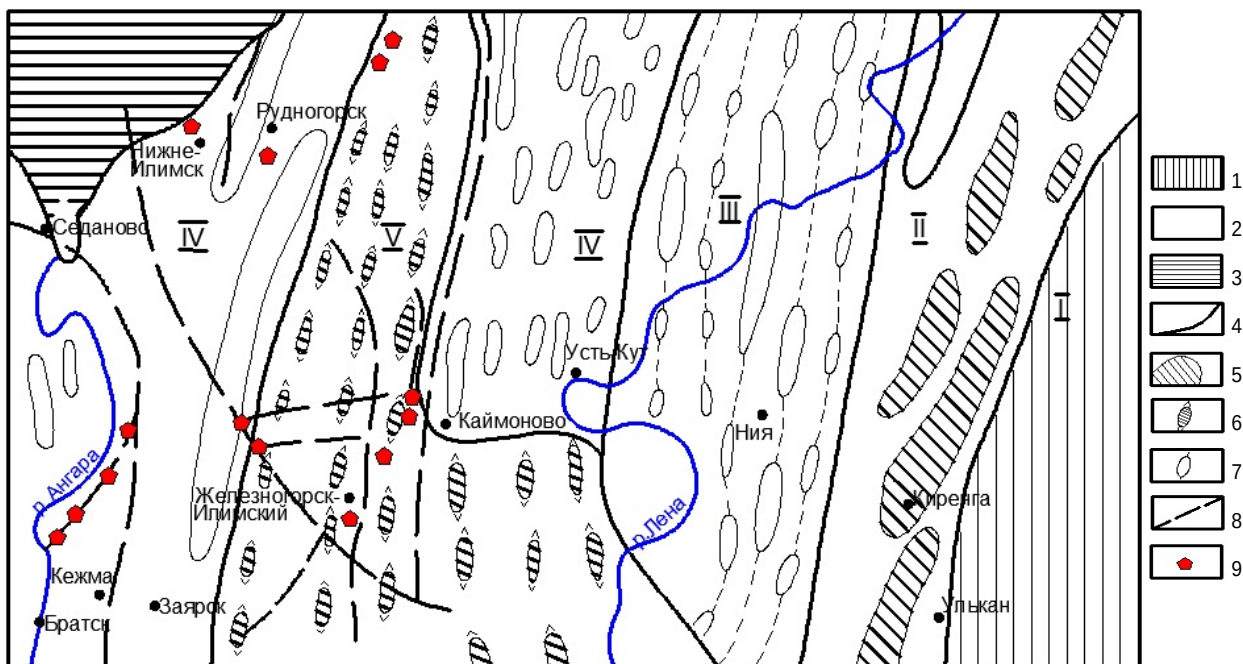


Рис. 1. Схема структурно-тектонического районирования центральной части Ангаро-Ленского краевого прогиба (масштаб 1:3000000) [3]:

1–3 – геологические структуры первого порядка: 1 – Байкальская складчатая область, 2 – Ангаро-Ленский краевой прогиб, 3 – Тунгусская синеклиза; 4 – границы структур второго порядка: I – Прибайкальский синклиналь, II – Лено-Киренгский антиклиналь, III – Марковско-Ичерская зона брахиформных складок, IV – Непское сводовое поднятие, V – Илим-Ленская зона брахиформных структур; 5–7 – геологические структуры третьего порядка: 5 – линейные антиклинальные складки, 6 – брахиформные антиклинальные складки, 7 – изолированные антиклинальные складки; 8 – разломы, инъецированные траппами; 9 – трубки взрыва

Fig. 1. Diagram of structural-tectonic zoning of the central part of the Angara-Lena foredeep (map scale 1:3000000) [3]:

1–3 – first order geological structures: 1 – Baikal folded region, 2 – Angara-Lena foredeep, 3 – Tunguska syneclise; 4 – boundaries of the second order structures: I – Baikal syncline, II – Lena-Kirenga anticline, III – Markovo-Icherskaya zone of brachiform folds, IV – Nepa arched uplift, V – Ilim-Lena zone of brachiform structures; 5–7 – third order geological structures: 5 – linear anticlinal folds, 6 – brachiform anticlinal folds, 7 – isolated anticlinal folds; 8 – trap-injected faults; 9 – diatremes

ного водообменов, резкой фильтрационной неоднородности водовмещающих пород, различиям в химическом составе и т. д.

На первом этапе исследования (этапе обучения) в результате анализа данных по объектам-эталонам в районах были выделены гидрогеологические бассейны высоких порядков, массивы, обводненные и экранирующие разломы.

При составлении файла градаций F2 в качестве наиболее значимых характеристик (факторов-предикторов) определены: морфология гидрогеологических структур, мощность и уровень подземных вод верхней гидродинамической зоны, дебиты родников, коэффициенты водопроницаемости вмещающих пород, коэффициенты динамичности родникового стока.

В каждом таксоне второго порядка в соот-

ветствии с перечисленными предикторами были выделены более мелкие структуры. Так, в пределах Илим-Ленского плато оконтурены брахиформные (синклинальные и антиклинальные) структуры и отдельные тектонические нарушения. Далее по той же схеме детализировались районы ряда железорудных месторождений (Коршуновского, Капаевского, Нерюндинского, Поливского, Байкальского).

На втором этапе работы анализировались точки наблюдения, слабо охарактеризованные в гидрогеологическом отношении (объекты-аналоги). В результате выполнения второго этапа моделирования были составлены схемы структурно-гидрогеологического районирования участков ряда железорудных месторождений, что позволило оптимизировать структуру дренажных систем.



Месторождения Ленского золоторудного района, находящиеся на площади Бодайбинского синклинория, приурочены к поверхностным водотокам различного порядка. Рудовмещающими породами являются песчано-гравийно-галечные четвертичные отложения, перекрывающие коренные породы архейско-протерозойского возраста. В соответствии с разработанной методикой определены ведущие предикторы: гипсометрическое положение россыпи относительно уреза воды, процент мерзлых пород, абсолютные отметки точек наблюдения, порядок водотока, к кото-

рому приурочена россыпь, на основании чего сформированы файлы F1 и F2. На втором этапе выделены три основных типа месторождений, характеризующихся различной степенью сложности инженерно-гидрогеологических условий [3]: россыпи с простыми условиями, россыпи с инженерно-гидрогеологическими условиями средней сложности и объекты со сложными условиями. На основании выполненной работы составлена схема типизации месторождений Ленского золоторудного района по сложности инженерно-гидрогеологических условий (рис. 2).

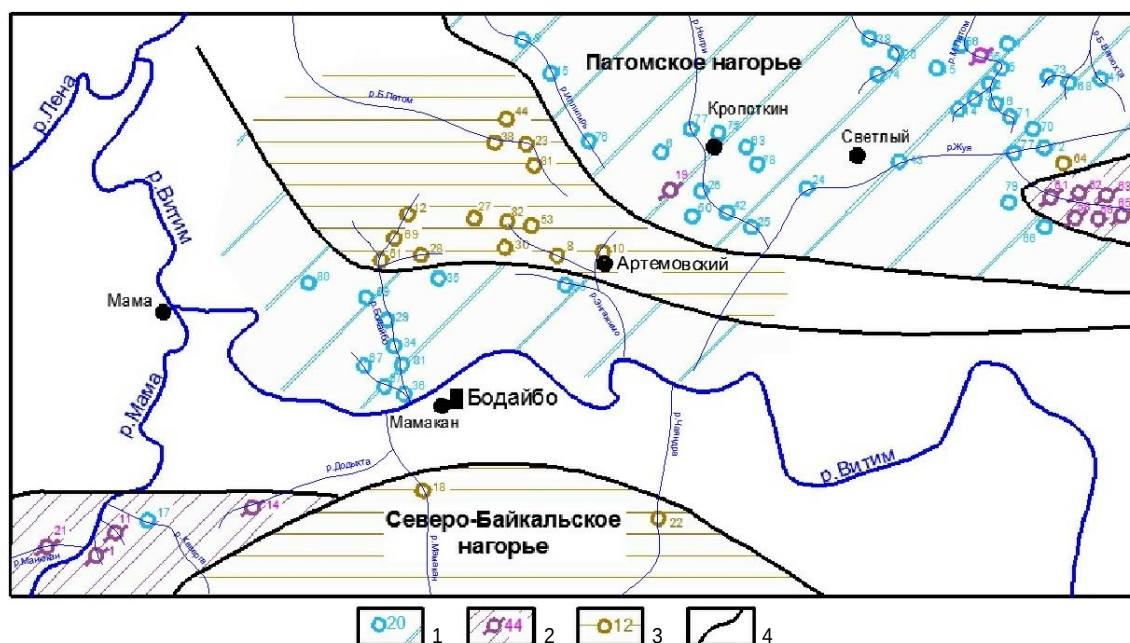


Рис. 2. Схема районирования месторождений Ленского золоторудного района по сложности инженерно-гидрогеологических условий [3] (масштаб 1:2000000):

1 – месторождения первой группы сложности; 2 – месторождения второй группы сложности; 3 – месторождения третьей группы сложности (цифра – модельный номер россыпи: 1 – Малый Патом (верх), 2 – Малый Патом (низ), 3 – Большой Баллаганах, 4 – Васильевский, 5 – Павловский, 7 – Нирокам, 8 – Камустяг, 9 – Большой Иллигирь, 10 – Большой Макалак, 11 – Тесса, 12 – Левая Накатами, 13 – Большая Бижухта, 14 – Додыхта (Мамакан), 15 – Кевакта, Большая Безымянка, 16 – Крещенский, 17 – Каверга, 18 – Икибзяк (низ), 19 – Угахан (низ), 20 – Большая Таймендра, 21 – Монокан, 22 – Чаянгро, 23 – Маракан, 24 – Кадаликан, 25 – Вача (среднее течение), 26 – Большая Безымянка (Ныгра), 27 – Большой Догалдын, 28 – Аканак-Накатами, 29 – Каменский (дражный полигон), 30 – Тактыкан-Берикан, 31 – Веселяевский, 32 – Большой Патом (дражный полигон), 83 – Горбылях (низ), 85 – Горбылях (верх)); 4 – условные границы между районами с различной сложностью инженерно-гидрогеологических условий

Fig. 2. Zoning diagram of Lena gold ore region fields according to the complexity of engineering and hydrogeological conditions [3] (map scale 1:2000000):

1 – first group complexity deposits; 2 – second group complexity deposits; 3 – third group complexity deposits (figure – model number of the placer: 1 – Malyi Patom (top), 2 – Malyi Patom (bottom), 3 – Bolshoi Ballaganach, 4 – Vasilievsky, 5 – Pavlovsky, 7 – Nirokam, 8 – Kamustyag, 9 – Bolshoi Illigir, 10 – Bolshoi Makalak, 11 – Tessa, 12 – Levaya Nakatami, 13 – Bolshaya Bizhuikhta, 14 – Dodykhta (Mamakan), 15 – Kevakta, Bolshaya Bezymyanka, 16 – Kreshchensky, 17 – Kaverga, 18 – Ikbzyak (bottom), 19 – Ugakhan (bottom), 20 – Bolshaya Taimendra, 21 – Monokan, 22 – Chayangro, 23 – Marakan, 24 – Kadalikan, 25 – Vacha (middle course), 26 – Bolshaya Bezymyanka (Nygra), 27 – Bolshoi Dogaldyn, 28 – Akanak-Nakatami, 29 – Kamensky (dredging site), 30 – Takhtykan-Berikan, 31 – Veselyaevsky, 32 – Bolshoi Patom (dredging site), 83 – Gorbylyakh (bottom), 85 – Gorbylyakh (top)); 4 – conditional boundaries between the areas with different complexity of engineering and hydrogeological conditions



Аналогичная работа, направленная на оптимизацию размещения поисково-разведочных скважин на воду, реализована на месторождениях углеводородов Чонской группы, расположенных в пределах Лено-Тунгусской нефтегазоносной провинции и характеризующихся весьма сложными геолого-гидрогеологическими условиями [4], в значительной степени обусловленными разломно-блоковым строением.

В структурном отношении территория приурочена к Непско-Ботуобинской антиклинали, находящейся в центральной части Непского свода. В геологическом строении исследуемой площади принимают участие образования архея, протерозоя, кембрийской системы, четвертичные отложения, а также триасовые интрузивные образования [5].

В силу слабой изученности выделение зон повышенной водообильности для последующего бурения по прямым гидрогеологическим признакам практически невозможно. В связи с этим разработан принцип оптимизации поисково-разведочного бурения на базе оценки комплексного показателя водообильности

с применением системно-модельного анализа, определение которого производится по косвенным признакам [3, 6, 7] и заключается в анализе, количественной дифференциации перечисленных показателей методом экспертных оценок и их последующем суммировании.

Анализ исходной информации на этапе обучения позволил выделить ряд факторов-предикторов, имеющих косвенный, часто расчетный характер, в наибольшей степени влияющих на водообильность перспективных подразделений и не представляющих особой сложности при их определении: модуль трещиноватости, линейный и площадной модули подземного стока, ряд аквальных и морфоскульптурных показателей, в том числе превышение и расстояние точек наблюдения над главной и ближней дренами, угол уклона рельефа, индекс пересеченности рельефа. На основе рассчитанного комплексного показателя водоносности выделены наиболее перспективные для бурения разведочных скважин участки (рис. 3) [7, 8].

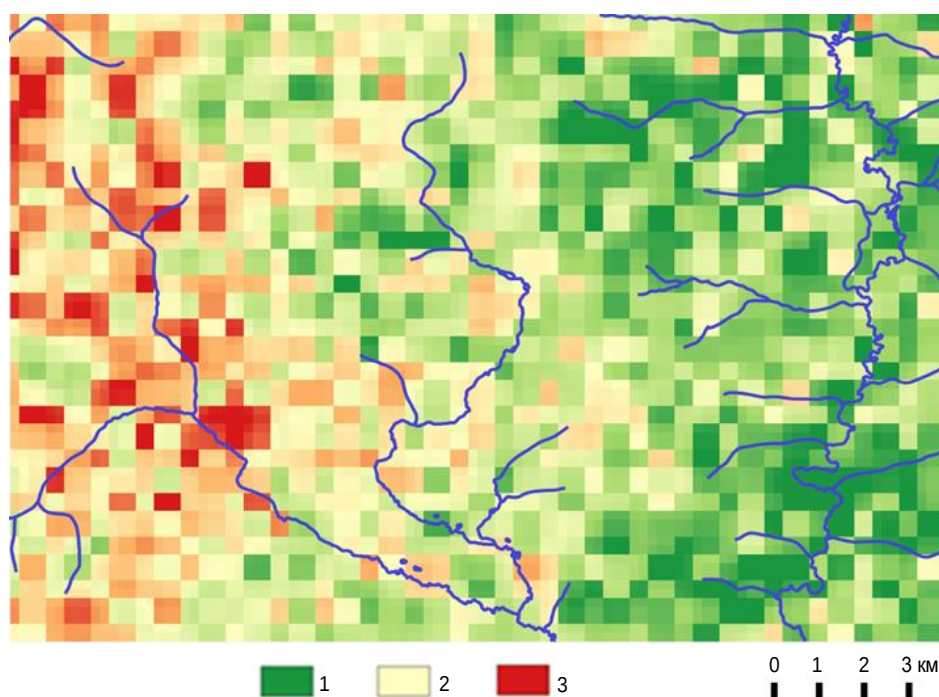


Рис. 3. Картографическое представление расчетного комплексного показателя водообильности в пределах территории Тымпучиканского нефтегазоконденсатного месторождения (фрагмент) [8]:
Комплексный показатель водообильности: 1 – низкие значения (неперспективные участки), 2 – нейтральная зона, 3 – высокие значения (перспективные участки)

Fig. 3. Core mapping of the calculated complex indicator of water abundance within the Tympuchikanskoye oil and gas condensate field (a fragment) [8]:
Complex indicator of water abundance: 1 – low values (unpromising areas), 2 – neutral zone, 3 – high values (promising areas)



Заключение

Из всего вышеизложенного можно сделать вывод о том, что реализация системного подхода к оценке гидрогеологической обстановки на месторождениях полезных ископаемых, апробированная на достаточно крупных объ-

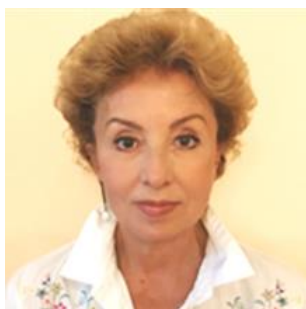
ектах Восточной Сибири, позволяет рекомендовать его к широкому внедрению в практику гидрогеологических исследований на начальных стадиях проведения геологоразведочных работ.

Список источников

1. Burges C.J.C. A tutorial on support vector machines for pattern recognition // *Data Mining and Knowledge Discovery*. 1998. Vol. 2. P. 121–167. <https://doi.org/10.1023/A:1009715923555>.
2. Bateman R.M. *Openhole log analysis and formation evaluation*. Society of Petroleum Engineers, 2012. 668 p.
3. Аузина Л.И. Опыт применения системно-модельного анализа в гидрогеологии // *Геология, поиски и разведка месторождений рудных полезных ископаемых: сб. науч. тр.* Иркутск: ИПИ, 1990. С. 138–145.
4. Коробова И.В., Макеев В.М. Оценка неотектонических движений в центральной части Восточно-Европейской платформы // *Геоэкология. Инженерная геология. Гидрогеология. Геокриология*. 2021. № 6. С. 17–27. <https://doi.org/10.31857/S0869780921060047>. EDN: WJQQZV.
5. Самсонов В.В., Ларичев А.И. Перспективные нефтегазоносные комплексы и зоны южной части Сибирской платформы // *Нефтегазовая геология. Теория и практика*. 2008. Т. 3. № 4. [Электронный ресурс]. URL: http://www.ngtp.ru/rub/4/43_2008.pdf (05.07.2023). EDN: JUTGIR.
6. Budyak A., Parshin A. GIS mapping of geological features of the Baikal mountain region based on integrated geochemical indicators // *Goldschmidt Conference Abstracts. Mineralogical Magazine*. 2013. Vol. 77. Iss. 5. P. 788.
7. Паршин А.В., Аузина Л.И., Просекин С.Н., Блинов А.В., Костерев А.Н., Лоншаков Г.С. [и др.] Геоинформационный подход к оценке ресурсной перспективности площадей (на примере месторождений подземных вод Восточной Сибири) // *Геоинформатика*. 2017. № 1. С. 11–20. EDN: YHWLYB.
8. Аузина Л.И. Один из подходов к оптимизации поисково-оценочных работ на воду на месторождениях нефтегазового комплекса Восточной Сибири // *Известия Сибирского отделения Секции наук о Земле Российской академии естественных наук. Геология, поиски и разведка рудных месторождений*. 2014. № 6. С. 82–88. EDN: ULNYOH.

References

1. Burges C.J.C. A tutorial on support vector machines for pattern recognition. *Data Mining and Knowledge Discovery*. 1998;2:121-167. <https://doi.org/10.1023/A:1009715923555>.
2. Bateman R.M. *Openhole log analysis and formation evaluation*. Society of Petroleum Engineers; 2012, 668 p.
3. Auzina L.I. Practical use of system-model analysis in hydrogeology. *Geologiya, poiski i razvedka mestorozhdenii rudnykh poleznykh iskopaemykh = Geology, prospecting and exploration of ore deposits*. Irkutsk: Irkutsk Polytechnic Institute; 1990, p. 138-145. (In Russ.).
4. Korobova I.V., Makeev V.M. Assessment of neotectonic movements in the central part of the eastern European platform. *Geoekologiya. Inzhenernaya geologiya. Hidrogeologiya. Geokriologiya*. 2021;6:17-27. (In Russ.). <https://doi.org/10.31857/S0869780921060047>. EDN: WJQQZV.
5. Samsonov V.V., Larichev A.I. Promising oil-gas complexes and zones of southern Siberian platform. *Neftegazovaya geologiya. Teoriya i praktika = Petroleum Geology – Theoretical and Applied Studies*. 2008;3(4). Available from: http://www.ngtp.ru/rub/4/43_2008.pdf [Accessed 5th July 2023]. (In Russ.). EDN: JUTGIR.
6. Budyak A., Parshin A. GIS mapping of geological features of the Baikal mountain region based on integrated geochemical indicators. *Goldschmidt Conference Abstracts. Mineralogical Magazine*. 2013;77(5):788.
7. Parshin A.V., Auzina L.I., Prosekin S.N., Blinov A.V., Kosterev A.N., Lonshakov G.S., et al. GIS-based approach to estimating area prospects for mineral deposits (on example of groundwater deposits of eastern Siberia territory). *Geoinformatika*. 2017;1:11-20. (In Russ.). EDN: YHWLYB.
8. Auzina L.I. An approach to groundwater exploration optimization at oil and gas fields of eastern Siberia. *Izvestiya Sibirskogo otdeleniya Sektzii 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*. 2014;6:82-88. (In Russ.). EDN: ULNYOH.

**Информация об авторе / Information about the author****Аузина Лариса Ивановна,**

кандидат геолого-минералогических наук, доцент,
доцент кафедры прикладной геологии, геофизики и геоинформационных систем,
руководитель лаборатории гидрогеологии,
институт «Сибирская школа геонаук»,
Иркутский национальный исследовательский технический университет,
г. Иркутск, Россия,

✉ lauzina@mail.ru

<https://orcid.org/0000-0002-4702-7863>

Larisa I. Auzina,

Cand. Sci. (Geol. & Mineral.), Associate Professor,
Associate Professor of the Department of Applied Geology,
Geophysics, and Geoinformation Systems,
Head of the Hydrogeology Laboratory,
Siberian School of Geosciences,
Irkutsk National Research Technical University,
Irkutsk, Russia,

✉ lauzina@mail.ru

<https://orcid.org/0000-0002-4702-7863>

Вклад автора / Contribution of the author

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

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

Конфликт интересов / Conflict of interests

Автор заявляет об отсутствии конфликта интересов.

The author declares no conflicts of interests.

Автор прочитал и одобрил окончательный вариант рукописи.

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

Информация о статье / Information about the article

Статья поступила в редакцию 16.08.2023; одобрена после рецензирования 29.08.2023; принята к публикации 08.09.2023.

The article was submitted 16.08.2023; approved after reviewing 29.08.2023; accepted for publication 08.09.2023.



ГЕОЛОГИЯ, ПОИСКИ И РАЗВЕДКА ТВЕРДЫХ ПОЛЕЗНЫХ ИСКОПАЕМЫХ, МИНЕРАГЕНИЯ

Научная статья

УДК 504.55+550.8.053:550.838.5

EDN: PEEDSN

DOI: 10.21285/2686-9993-2023-46-3-289-305



Динамическая физико-геологическая модель сложной складчатости по палеомагнитным данным

К.М. Константинов^а

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

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

Резюме. Целью работы являлась оценка возможности применения математического аппарата пространственных вращений для решения вопросов установления природы и возраста векторов естественной остаточной намагниченности в условиях сложных тектонических дислокаций горных пород, проявленных на территориях современных складчатых сооружений обрамления платформ. Для формирования сложных тектоно-магматических систем целесообразно использовать динамические физико-геологические модели. Математическое (компьютерное) моделирование по сравнению с другими методами изучения геологических процессов характеризуется более высокой точностью, экономичностью и однозначностью интерпретации данных для достижения поставленной цели. На основе динамической физико-геологической модели сложной складчатости разработан алгоритм и приведены результаты математического моделирования векторов естественной остаточной намагниченности для решения прямой и обратной задач по корректному применению теста складки в условиях сложных деформаций горных пород. На основе динамической физико-геологической модели формирования сложной складчатой структуры показано, что по выделенным в ходе лабораторных экспериментов по размагничиванию векторам характеристической естественной остаточной намагниченности можно определить их возраст относительно этапов складчатости, а также в зависимости от этого полностью или частично восстановить количество, последовательность и направленность тектонических дислокаций. Это позволит более эффективно решать минерагенические и геодинамические задачи развития складчатых областей на основе палеомагнитных данных.

Ключевые слова: динамическая физико-геологическая модель, палеомагнетизм, тест складки, характеристическая естественная остаточная намагниченность

Для цитирования: Константинов К.М. Динамическая физико-геологическая модель сложной складчатости по палеомагнитным данным // Науки о Земле и недропользование. 2023. Т. 46. № 3. С. 289–305. <https://doi.org/10.21285/2686-9993-2023-46-3-289-305>. EDN: PEEDSN.

GEOLOGY, PROSPECTING AND EXPLORATION OF SOLID MINERALS, MINERAGENY

Original article

Dynamic physical-geological model of complex folding according to paleomagnetic data

Konstantin M. Konstantinov^а

^аIrkutsk National Research Technical University, Irkutsk, Russia

^бInstitute of the Earth Crust SB RAS, Irkutsk, Russia

Abstract. The purpose of the study is to evaluate the possibility of using the mathematical apparatus of spatial rotations to solve the determination issues of the nature and age of natural remanent magnetization vectors under complex tectonic



dislocations of rocks manifested in the areas of modern folded structures of platform framing. Dynamic physical-geological models are shown to be useful when forming complex tectonic-magmatic systems. Mathematical (computer) modeling in comparison with other methods of studying geological processes features higher accuracy, cost-effectiveness and unambiguity of data interpretation in achieving the set goal. On the basis of dynamic physical-geological model of complex folding, an algorithm is developed and the results of mathematical modeling of natural remanent magnetization vectors are given for solving direct and inverse problems on correct application of the fold test under complex rock deformations. The dynamic physical-geological model of complex folded structure formation shows that the characteristic natural remanent magnetization vectors identified in laboratory experiments on demagnetization can be used to determine their age relative to the folding stages, and, depending on this, fully or partially restore the number, sequence and direction of tectonic dislocations. This will enable us to solve the mineralogenic and geodynamic problems of folded region development more effectively on the basis of paleomagnetic data.

Keywords: dynamic physical-geological model, paleomagnetism, fold test, characteristic natural remanent magnetization

For citation: Konstantinov K.M. Dynamic physical-geological model of complex folding according to paleomagnetic data. *Nauki o Zemle i nedropol'zovanie = Earth sciences and subsoil use*. 2023;46(3):289-305. (In Russ.). <https://doi.org/10.21285/2686-9993-2023-46-3-289-305>. EDN: PEEDSN.

Введение

В системе научных знаний моделирование используется для решения разного рода проблем, в том числе в ходе формирования и проверки гипотез. Модель – это искусственно созданный объект, который, будучи аналогичен исследуемому объекту, отображает и воспроизводит в более простом, уменьшенном (увеличенном) виде структуру, свойства, взаимосвязи и отношения между элементами исследуемого объекта, непосредственное изучение которого связано с какими-либо трудностями, большими затратами средств и энергии или просто недоступно¹. Практически модель является наглядным образом теории. Цель моделирования заключается в создании модели, максимально подобной оригиналу, и извлечении на ее основе информации, которую по каким-либо причинам трудно или невозможно получить в естественных условиях, или тогда, когда необходимо облегчить процесс исследования объекта. Виды моделирования могут быть различными: существует физическое, аналоговое, концептуальное, математическое моделирование и т. д.

В геологии, где предметами исследования служат Земля и ее оболочки, горные породы разного генезиса и связанные с ними различные процессы и пр., моделирование является единственным способом (методом) для получения информации об их строении и развитии. Для этого предназначены физико-геологические модели (ФГМ), принципы построения которых развивал профессор Г.С. Вахромеев [1]. ФГМ представляют собой систему абстрактных возмущающих тел и вызываемых ими аномальных эффектов, которые аппроксимируют геологический объект и с необходимой для моделирования детальностью обобщенно отражают его структуру, размеры, форму, петрофизические свойства и соответствующее им объемное распределение физических полей. Современные детерминированные и вероятностно-стохастические ФГМ относятся к статическим, то есть описывают геологические структуры, месторождения полезных ископаемых или рудные тела как итог происходивших ранее геологических процессов, отражаемый современным распределением физических полей. В то же время геофизические поля несут информацию о самих геологических процессах, их характере, смене одного другим, глубине протекания каждого из них.

ФГМ, направленные на установление зависимости между физическими полями и протекающими геологическими процессами во времени, именуются динамическими [1]. Благодаря динамическим ФГМ можно предсказать размещение месторождений полезных ископаемых (ретроспективный анализ), землетрясения, экологические катастрофы и т. п. Кроме того, динамические ФГМ широко используются и для доказательства выводов теории тектоники литосферных плит² [2–4]. Эта теория развивается на стыке нескольких частных научных теорий (разрастание

¹ Кондаков Н.И. Логический словарь-справочник. М.: Наука, 1975. 720 с.

² Константинов К.М. Динамическая физико-геологическая модель Байкальской складчатой области по палеоманнитным данным: автореф. дис. ... канд. геол.-минерал. наук: 04.00.12. Иркутск, 1998. 18 с.



океанического дна, дрейф континентов, тектоника литосферы и др.), в основе которых лежат данные из разных областей науки. Например, в основе гипотезы Вайна – Метьюза [5], объясняющей разрастание океанического дна, лежит динамическая ФГМ: мы наблюдаем «старение» океанической коры от центра спрединга (срединно-океанический хребет) к материкам одновременно с увеличением ее мощности, глубин океана и числа магнитных полосовых аномалий, зависящих от инверсий магнитного поля Земли. Из всей совокупности фактов, подтверждающих дрейф континентов (совпадение их очертания, продолжение геологических структур, сейсмические пояса, «горячие точки» и др.), траектория кажущейся миграции палеомагнитных полюсов Земли тоже является динамической ФГМ: каждому геологическому периоду соответствуют определенные координаты палеомагнитных полюсов относительно географического положения платформ [6]. «Ископаемый» (прошлый) магнетизм, древнее геомагнитное поле, запись которого сохранилась в естественной остаточной намагниченности (ЕОН) *In* горных пород подобно жесткому магнитному носителю, называется палеомагнетизмом. Изучением палеомагнетизма занимается наука палеомагнитология, которая представляет собой раздел геомагнитологии (метод исторической геофизики), учение о геомагнитном поле прошлых геологических эпох. Палеомагнитология возникла на стыке ряда отраслей физики, геофизики, геологии и является самостоятельной научной дисциплиной со своей методикой исследований, объектами изучения и областью приложения результатов. Результаты исследований находят приложение в изучении строения и эволюции Земли, в решении вопросов практической геологии³. Согласно принципу «центрального осевого диполя», являющемуся основополагающим принципом палеомагнетизма, двигаются не магнитные полюсы Земли, а материки (литосферные плиты). Поскольку магнитный полюс жестко связан с материком, благодаря последовательному «протягиванию» траектории кажущейся миграции палеомагнитного полюса через северный географический полюс можно реконструировать его палеогеографическое положение. Таким образом, с помощью современных компьютерных программ удастся восстановить палеогеографическое положение материков в разные геологические эпохи. Динамические ФГМ целесообразно использовать для решения широкого круга задач, например:

- глобальных: дрейф континентов, палеоклимат и связанные с ним экзогенные месторождения полезных ископаемых, развитие живых организмов и пр. [6–9];
- региональных: развитие горно-складчатых сооружений, магматизм и минералогия платформ [7, 8, 10, 11];
- локальных: формирование отдельных геологических структур, тел (в том числе месторождений полезных ископаемых), катастрофических явлений (оползни, землетрясения и т. п.) и др. [1, 3, 11, 12].

Как видно, в основе построения многих динамических ФГМ лежат палеомагнитные данные⁴ [6, 13]. Следует отметить, что возможности палеомагнитного метода для палеогеографических реконструкций блоков земной коры, участвующих в строении горно-складчатых областей, ограничены из-за сложных полихронных деформаций горных пород и развития в них разнообразных физико-химических процессов. В отличие от палеомагнитных реконструкций древних платформ (литосферных плит) реконструкции слагающих геосинклинальные области экзотических блоков (террейны) с целью изучения истории их геодинамического развития сопряжены с очевидными трудностями:

1. Сложными полихронными деформациями, последовательно искажающими направления векторов характеристической ЕОН *In^{ch}*, приобретенными горными породами с момента образования. Характеристическая остаточная намагниченность *In^{ch}* представляет собой наиболее стабильную компоненту ЕОН, выделенную в ходе магнитной чистки, на диаграмме Зийдервельда идущую в нуль [14]. Компоненты вектора ЕОН, которые претендуют на последующее получение

³ Палеомагнитология, петромагнитология и геология: словарь-справочник для соседей по специальности / сост. Д.М. Печерский, Д.Д. Соколов. 123 с.

⁴ Там же.



палеомагнитного результата (то есть могут оказаться синхронными изучаемому геологическому событию прошлого), в практике палеомагнитных исследований принято обозначать как характеристические. Для датировки и оценки природы характеристической остаточной намагниченности необходим комплекс дополнительных исследований⁵.

2. Возможными перемагничиваниями первичных (синхронных горным породам) векторов ЕОН под действием химических, динамических и других процессов с образованием разных типов намагниченностей.

В таких сложных тектонических ситуациях необходимо надежное обоснование относительного возраста векторов ЕОН зафиксированными горными породами в момент становления. Очевидно, что наиболее оптимальным методом решения данной проблемы, обеспечивающим высокую точность и минимальные затраты времени по сравнению с физическим моделированием, будет являться математическое (в перспективе компьютерное) моделирование, основанное на законах аналитической геометрии, векторной алгебры и матричного исчисления⁶ [15, 16]. Это определяет актуальность проведения математического моделирования векторов ЕОН как основы обработки и интерпретации палеомагнитных данных для сложных тектонофизических обстановок. Основная цель математического моделирования заключается в разработке алгоритма реконструкции этапов складчатости по векторам характеристической ЕОН. Для этого на примере динамической ФГМ необходимо провести решения прямой и обратной задачи геофизики (палеомагнетизма) как основы количественной интерпретации тектонических деформаций горных пород складчатых областей.

Материалы и методы исследования

На уровне локальной динамической ФГМ необходимо реализовать два важных момента, от которых зависит вся дальнейшая интерпретация палеомагнитных исследований:

- получение корректных статистических параметров векторов характеристической ЕОН;
- обоснование природы и возраста векторов характеристической ЕОН.

При статистическом анализе направленных величин используется аппроксимация распределений единичных векторов ЕОН круговым рассеиванием, в котором вычисляется четыре параметра: среднее склонение D , наклонение J , кучность k и радиус овала доверия α_{95} ⁷ [6, 13, 17, 18]. Первые два аналогичны элементам магнитного поля Земли и обычно изображаются на равнопромежуточной полярной проекции единичной сферы. Параметры k и α_{95} характеризуют плотность распределения векторов ЕОН вокруг среднего направления.

Получение доказательств возраста и природы векторов характеристической ЕОН является одним из самых сложных вопросов. Палеомагнитные исследования основаны на «гипотезе сохранения» горными породами ЕОН в течение продолжительного времени⁸ [6, 13, 17, 19]. Гипотеза предполагает, что вектор ЕОН может содержать ряд остаточных намагниченностей, приобретенных горными породами и рудами за все время своего существования. В связи с этим при компонентном анализе ЕОН In горных пород мы можем столкнуться с несколькими ее разновидностями, которые классифицируются по различным признакам:

- по генезису: ориентационная ЕОН In^o , термоостаточная ЕОН In^t , химическая ЕОН In^c , вязкая ЕОН In^v и др.;
- по отношению к складчатости: до-, син- или постскладчатая ЕОН In^a , In^s , In^p ;
- по времени образования: первичная ЕОН In^0 и метакронная (наложенная) ЕОН In^m .

⁵ Палеомагнитология, петромагнитология и геология: словарь-справочник для соседей по специальности / сост. Д.М. Печерский, Д.Д. Соколов. 123 с.

⁶ Александров П.С. Курс аналитической геометрии и линейной алгебры: учебник для студентов. М.: Наука, 1979. 511 с.

⁷ Шипунов С.В. Статистика палеомагнитных данных: лекции. М.: ГЕОС, 2000. 80 с.

⁸ Палеомагнитология, петромагнитология и геология: словарь-справочник для соседей по специальности / сост. Д.М. Печерский, Д.Д. Соколов. 123 с.



Например, первичная ЕОН In^0 может быть ориентационной или термоостаточной и одновременно доскладчатой. Метахронная ЕОН In^m может возникнуть химическим путем или под действием динамических нагрузок (эффект Виллари) до, в процессе или после складкообразования и т. п. Таким образом, современная магнитная «память» горных пород может одновременно содержать некоторое множество палеомагнитных векторов (компонент) ЕОН: $In = In^0 + In^m + \dots + In^N$, которые в силу «гипотезы фиксации» (горные породы при своем становлении намагничиваются по направлению геомагнитного поля времени и места их образования) будут нести определенную информацию о сформировавших их геологических процессах. Любая из вышеперечисленных компонент может быть выделена из суммарной многокомпонентной ЕОН в ходе лабораторных экспериментов по размагничиванию переменным магнитным полем, температурой и др. Не исключено, что магнитная запись горных пород о событиях далекого прошлого может быть забита или полностью стерта другими видами ЕОН, связанными с более поздними физико-химическими или геологическими процессами.

Для доказательства природы выделенной характеристической ЕОН необходим комплекс, позволяющий в той или иной мере однозначно определить величину и направление геомагнитного поля в точке исследований, привязанного ко времени некоторого геологического события. Данный комплекс включает три группы признаков: геологические, физические и геофизические (палеомагнитные)⁹. Для обоснования палеомагнитной надежности (набора необходимых и достаточных признаков (критериев), позволяющих оценить надежность (достоверность) палеомагнитных данных для решения поставленной задачи¹⁰) используется ряд тестов, одним из основных среди которых является «тест складки» Грэхема [20–30] – способ оценки палеомагнитной стабильности (устойчивости (сохранности) величины и направления ЕОН или ее компонент во времени; оценка палеомагнитной стабильности является частью проблемы обоснования палеомагнитной надежности¹¹) и оценки времени приобретения ЕОН или ее компонент, выделенных чистками, относительно времени смятия изучаемых пород в складки. Тест складки анализирует изменение конформности (по кучности k и / или радиусу овала доверия α_{95}) векторов характеристической ЕОН при пересчете из современной системы координат (ССК) в древнюю систему координат (ДСК) путем пропорционального введения поправок за элементы залегания пород из крыльев складки (рис. 1): доскладчатый (тест положительный) или постскладчатый (тест отрицательный). В случае доскладчатого образования ЕОН векторы последней в разных частях складки располагаются одинаково относительно слоистости (см. рис. 1, а); в случае, если ЕОН образовалась после складчатости, ее векторы располагаются параллельно друг другу независимо от элементов залегания пород в разных частях складки (см. рис. 1, с). Промежуточные варианты (синскладчатая намагниченность) имеют экстремальную картину в интервале от 0 до 100 % (см. рис. 1, б). Количественное соотношение до- и послескладчатой компонент ЕОН видно по соотношению кучностей векторов в современных (географических) координатах k_e или α_{95g} (то есть без введения поправки на залегание) и в древних (стратиграфических) координатах k_c или α_{95s} (после «выпрямления» складки до горизонтального залегания слоев). А как быть в случаях, когда с проявлениями тех или других тектонофизических процессов, поэтапно во времени осложняющих первоначальный облик пород, связан определенный тип характеристической ЕОН?

В связи с тем, что мы всегда имеем дело с векторами ЕОН, сориентированными только в ССК, то в условиях полихронной сложной складчатости возможности теста складки по определению природы и относительного возраста характеристической ЕОН горных пород ограничены. Сегодня ни один из модернизированных тестов складки не решает подобных вопросов. В лучшем случае в направления характеристической ЕОН по методике, предложенной в работе [6],

⁹ Палеомагнитология, петромагнитология и геология: словарь-справочник для соседей по специальности / сост. Д.М. Печерский, Д.Д. Соколов. 123 с.

¹⁰ Там же.

¹¹ Там же.

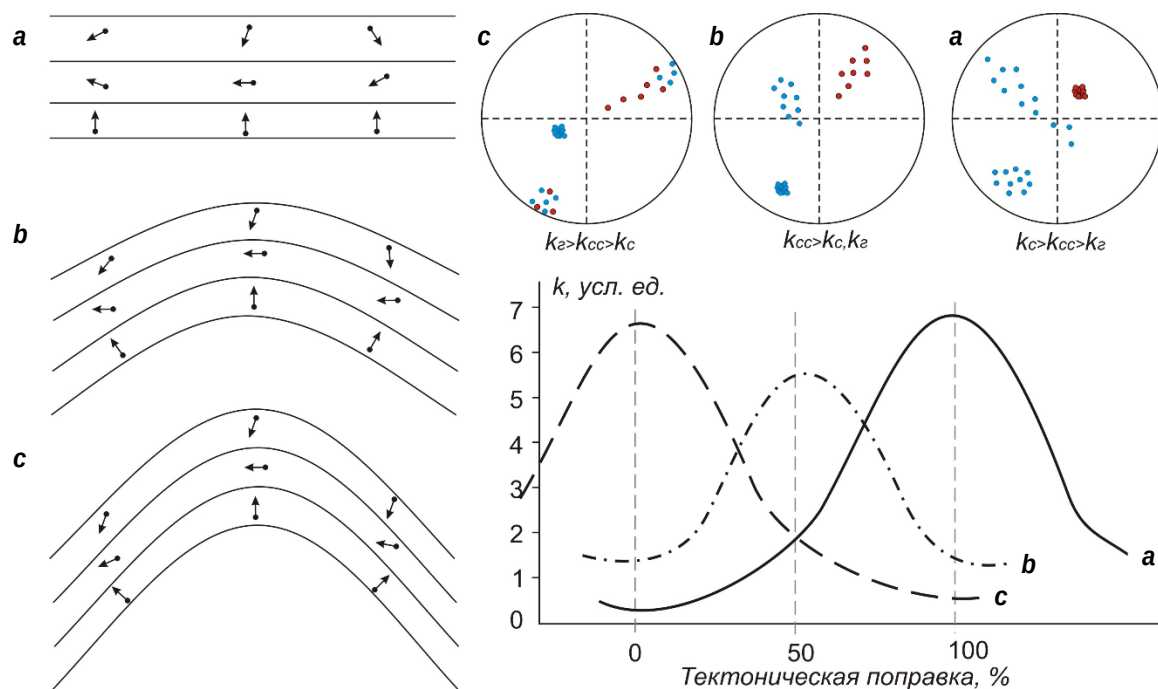


Рис. 1. Зависимость кучности распределения векторов характеристической естественной остаточной намагниченности от введения тектонической поправки за элементы залегания пород в крыльях складки

Естественная остаточная намагниченность: а – доскладчатая; б – синскладчатая; с – постскладчатая
Синие / красные кружочки – проекции векторов характеристической естественной остаточной намагниченности (первичной естественной остаточной намагниченности)

на положительную / отрицательную полусферу стереограммы

k_c , k_{cc} и k_a – кучность в стратиграфической (древней), синскладчатой (промежуточной) и географической (современной) системах координат соответственно

Fig. 1. Dependence of characteristic natural remanent magnetization vector distribution on tectonic correction introduction for rock occurrence elements in the fold limbs

Natural remanent magnetization: a – pre-folding; b – syn-folding; c – postfolding

Blue / red circles are projections of the vectors of characteristic natural remanent magnetization (primary natural remanent magnetization) on the positive / negative hemisphere of the stereogram

k_c , k_{cc} and k_a – helicity in the stratigraphic (ancient), synfolded (intermediate), and geographic (modern) coordinate systems, respectively

вносится только поправка за наклон одного из шарниров складки, что при отсутствии дополнительной тектонической информации не всегда оправдано (как показано ниже). Таким образом, игнорирование этой проблемы может отрицательно сказаться на качестве палеомагнитных реконструкций.

Результаты исследования

Алгоритм векторных преобразований. В палеомагнетизме, согласно курсу аналитической геометрии, сложные вращения осуществляются путем последовательного выполнения элементарных поворотов на углы α , β , γ вокруг осей Z (вертикальная), Y (широтная) и X (меридиональная) пространственной декартовой системы координат соответственно¹². Например, преобразование вектора $[V_x, V_y, V_z]$ в результате вращения на угол α (в нашем случае является азимутом падения крыла или шарнира складки и меняется от 0 до 360°) в вектор $[V_x', V_y', V_z']$ реализуется матрица вида

$$[V_x', V_y', V_z'] = [V_x, V_y, V_z] \cdot \begin{bmatrix} \cos \alpha & \sin \alpha & 0 \\ -\sin \alpha & \cos \alpha & 0 \\ 0 & 0 & 1 \end{bmatrix} = [V_x, V_y, V_z] \cdot R(\alpha) \text{ или } \bar{V}' = \bar{V} \cdot R(\alpha).$$

¹² Александров П.С. Курс аналитической геометрии и линейной алгебры: учебник для студентов. М.: Наука, 1979. 511 с.



Матрица, реализующая вращение вектора $[Vx, Vy, Vz]$ на угол β (в нашем случае является углом падения крыла или шарнира складки и меняется от -90° до 90°) вокруг оси Y , имеет вид

$$[Vx', Vy', Vz'] = [Vx, Vy, Vz] \cdot \begin{bmatrix} \cos\beta & 0 & -\sin\beta \\ 0 & 1 & 0 \\ \sin\beta & 0 & \cos\beta \end{bmatrix} = [Vx, Vy, Vz] \cdot R(\beta) \text{ или } \bar{V}' = \bar{V} \cdot R(\beta).$$

Матрица, реализующая вращение вектора $[Vx, Vy, Vz]$ на угол γ (например, поворот вмещающего складку блока) вокруг оси X , имеет вид

$$[Vx', Vy', Vz'] = [Vx, Vy, Vz] \cdot \begin{bmatrix} 1 & 0 & 0 \\ 0 & \cos\gamma & \sin\gamma \\ 0 & -\sin\gamma & \cos\gamma \end{bmatrix} = [Vx, Vy, Vz] \cdot R(\gamma) \text{ или } \bar{V}' = \bar{V} \cdot R(\gamma).$$

Сложные вращения реализуются матричным произведением элементарных поворотов:

$$V' = V \cdot R(\alpha) \cdot R(\beta) \cdot R(\gamma) = V \cdot R(\alpha, \beta, \gamma).$$

Для решения поставленной задачи был использован математический аппарат пространственных вращений, являющийся основой системы обработки палеомагнитных данных ОПАЛ-3 [15, 16, 31, 32]. Для определения взаимоотношения векторов ЕОН со складчатостью применялась общая формула учета любого числа количественно заданных элементарных дислокаций:

$$(Jk', Dk') = (J, D) \cdot \prod_{i=1}^k [Ri], \quad (1)$$

где (Jk', Dk') – направление ЕОН после учета i -й элементарной дислокации; Ri – матрица (см. выше), реализующая учет i -го элементарного поворота пород:

$$Ri = \begin{cases} R(-\alpha i, \beta i, \alpha i), & \text{если } \beta i \neq 0; \\ R(-\alpha i), & \text{если } \beta i = 0. \end{cases}$$

Краткая запись матричного уравнения (1) наиболее удобна для решения подобных задач, так как позволяет реализовать сложные повороты, зная только исходные параметры геологической структуры: азимуты и углы падения горных пород.

Алгоритм математического моделирования достаточно прост¹³ [31, 33, 34]. Рассмотрим его на примере динамической ФГМ формирования сложной складки (рис. 2). Для этого проанализируем результаты пересчета векторов характеристической ЕОН из ССК в ДСК с учетом наклона шарниров складки, то есть когда они вместе с горными породами испытали одну или две дислокации. В последнем случае, согласно предложенной ФГМ, шарниры складки могут оказаться следствием двух разделенных во времени и по направлениям приложения сил этапов тектонической активизации.

Итак, при наличии направлений характеристической ЕОН в ССК (J, D) , а также современных элементов залегания горных пород в точке опробования: азимутов и углов наклона крыла (Ar, Br) и двух ограничивающих его шарниров $(ar', br'$ и $ar'', br'')$ складки – рассчитывают элементы залегания пород, имевшие место до вторичного наклона пород (промежуточная система координат (ПСК)):

1. Определяют нормаль:

$$n = (Bn, An) = (90 - Br, 180 + Ar).$$

2. Определяют положение нормали до наклона шарнира складки соответственно:

$$n' = (Bn', An') = (Bn, An) \cdot R(-\alpha, \beta, \alpha), \text{ если } \alpha = ar', \beta = br';$$

$$n'' = (Bn'', An'') = (Bn, An) \cdot R(-\alpha, \beta, \alpha), \text{ если } \alpha = ar'', \beta = br''.$$

3. Пересчитывают элементы залегания пород, которые были до второй дислокации, соответственно:

$$(Br', Ar') = (90 - Bn', 180 + An'),$$

$$(Br'', Ar'') = (90 - Bn'', 180 + An''),$$

где Br', Ar' и Br'', Ar'' – элементы залегания пород, исправленные за наклон шарнира складки соответственно; $\alpha = ar' + Dt$, $\beta = br'$ и $\alpha = ar'' + Dt$, $\beta = br''$; Dt – местное склонение.

¹³ Константинов К.М. Динамическая физико-геологическая модель Байкальской складчатой области по палеомагнитным данным: автореф. дис. ... канд. геол.-минерал. наук: 04.00.12. Иркутск, 1998. 18 с.

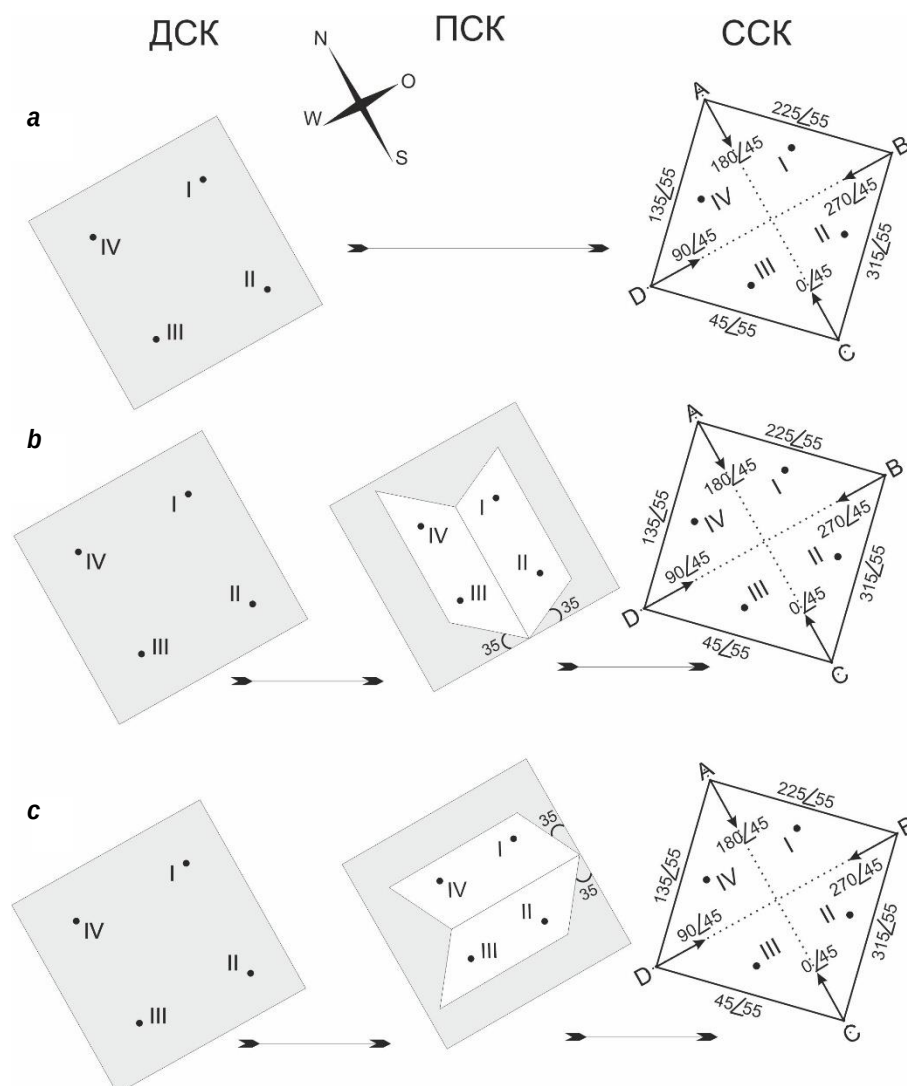


Рис. 2. Динамическая физико-геологическая модель формирования изоклиальной синклиальной складки с наклонными шарнирами в результате:

а – всестороннего сжатия горных пород; б / с – вначале широтного / меридионального, а затем меридионального / широтного сжатий в горизонтальной плоскости
ДСК, ПСК и ССК – древняя, промежуточная и современная системы координат соответственно
I, II, III и IV – точки отбора проб
↑ – направление падения шарнира

270°/45 – азимут и угол падения крыла или шарнира складки

Fig. 2. Dynamic physical-geological model of isoclinal synclinal fold formation with inclined hinges as a result of:

а – all-round compression of rocks; б / с – firstly latitudinal / meridional and then meridional / latitudinal compressions in the horizontal plane

ДСК, ПСК and ССК – ancient, intermediate and modern coordinate systems, respectively

I, II, III and IV – sampling points

↑ – direction of pivot dip

270°/45 – azimuth and angle of incidence of the limb or fold hinge

4. Имея все исходные данные, согласно формуле (1) можно рассчитать направления древней ЕОН пород, испытавших несколько фаз складчатости, путем последовательного учета элементарных дислокаций от поздних к ранним. В нашем случае согласно формуле

$$(J', D') = (J, D) \cdot R(-\alpha, \beta, \alpha, -\alpha', \beta, \alpha'), \quad (2)$$

можно предположить как минимум пять вариантов древних направлений векторов характеристической ЕОН (J^c , D^c), соответствующих возможным возрастным взаимоотношениям намагниченности и складчатости:



$$(J^C, D^C) = \begin{cases} (J_1^0, D_1^0), \text{ если } \alpha = Ar + Dt, \beta = Br, \alpha' = 0, \beta' = 0. \\ (J_2^0, D_2^0), \text{ если } \alpha = ar' + Dt, \beta = br', \alpha' = Ar' + Dt, \beta' = Br'. \\ (J_3^0, D_3^0), \text{ если } \alpha = ar'' + Dt, \beta = br'', \alpha' = Ar'' + Dt, \beta' = Br''. \\ (J_4^m, D_4^m), \text{ если } \alpha = ar' + Dt, \beta = br', \alpha' = 0, \beta' = 0'. \\ (J_5^m, D_5^m), \text{ если } \alpha = ar'' + Dt, \beta = br'', \alpha' = 0, \beta' = 0. \end{cases} \quad (2, a)$$

Направления (J_1^0, D_1^0) , (J_2^0, D_2^0) , (J_3^0, D_3^0) определяют характеристическую ЕОН In^0 как древнюю и, возможно, первичную ЕОН In^0 , возникшую до начала деформаций с учетом их последовательности. Направление (J_1^0, D_1^0) не учитывает тектоническую поправку за наклон шарнира складки и может интерпретироваться как результат только одной дислокации из ССК в ДСК, минуя промежуточную стадию (см. рис. 2, а). Направления (J_4^m, D_4^m) и (J_5^m, D_5^m) определяют характеристическую ЕОН In^0 как метакхронную ЕОН In^m , возникшую в период между двумя деформациями (ПСК) с учетом их взаимной комбинации (см. рис. 2, б, в).

5. Критерием для выбора оптимального варианта служит максимальное значение кучности ($k = \max$) или минимальное значение радиуса овала доверия ($\alpha_{95} = \min$) группировки In^0 , полученное в ходе пересчетов в разные системы координат. Обязательным условием для решения подобных задач является строгое соблюдение последовательности дислокаций.

Результаты моделирования. На основе предложенного алгоритма решены прямая (расчет направлений первичной ЕОН In^0 из ДСК в ССК) и обратная (расчет направлений характеристическую ЕОН In^0 из ССК в ПСК и ДСК) задачи¹⁴ [33, 34].

Рассмотрим прямую задачу.

Дано:

1) направление первичной ЕОН In^0 : $(J^0, D^0) = (-30, 325)$;

2) современные азимут и угол падения пород в четырех точках отбора проб (ТОП) (см. рис. 2):

$$(Ar, Br) = \begin{cases} I = 225, 55; \\ II = 315, 55; \\ III = 45, 55; \\ IV = 135, 55; \end{cases}$$

3) современные азимут и угол падения шарниров складки в точках А, В, С и D:

$$(ar, br) = \begin{cases} A = 180, 45; \\ B = 270, 45; \\ C = 360, 45; \\ D = 90, 45. \end{cases}$$

Определить: направления (J, D) первичной ЕОН In^0 в ССК в ТОП I, II, III и IV.

Решение:

1) согласно пунктам 1–3 алгоритма (см. выше) вычисляем промежуточные элементы залегания, исправленные за наклон шарниров для второго и третьего случая, когда крылья складки первоначально испытали поворот вокруг горизонтальной оси меридионального (см. рис. 2, б)

$$(Br', Ar') = \begin{cases} I = 270, 35; \\ II = 270, 35; \\ III = 90, 35; \\ IV = 90, 35 \end{cases}$$

либо широтного простирания (см. рис. 2, в)

$$(Br'', Ar'') = \begin{cases} I = 180, 35; \\ II = 360, 35; \\ III = 360, 35; \\ IV = 180, 35; \end{cases}$$

¹⁴ Константинов К.М. Динамическая физико-геологическая модель Байкальской складчатой области по палеомагнитным данным: автореф. дис. ... канд. геол.-минерал. наук: 04.00.12. Иркутск, 1998. 18 с.



2) по условию задачи используем матричную формулу (2, а) только для первых трех вариантов:

$$(J, D) = \begin{cases} (J_1, D_1), \text{ если } \alpha = Ar + Dt, \beta = Br, \alpha' = 0, \beta' = 0. \\ (J_2, D_2), \text{ если } \alpha = Ar' + Dt, \beta = Br', \alpha' = ar' + Dt, \beta' = br'. \\ (J_3, D_3), \text{ если } \alpha = Ar'' + Dt, \beta = Br'', \alpha' = ar'' + Dt, \beta' = br''. \end{cases}$$

Результаты счета сводим в табл. 1 и выносим на стереограммы (рис. 3). Как видно, в трех вариантах решений прямой задачи для одних и тех же (исходных) структур направления векторов ЕОН в ССК различаются. Следовательно, результат зависит от числа, последовательности и направленности тектонических деформаций! Этот момент весьма важен при интерпретации решений обратной задачи. В первом случае направления ЕОН в ССК получены путем всестороннего сжатия (см. рис. 2, а), во втором (третьем) случае – сначала широтного (меридионального), а затем меридионального (широтного) (см. рис. 2, б, с).

Используя возможности нашего математического аппарата для определения возрастного взаимоотношения векторов ЕОН со складчатостью, решим обратную задачу.

Таблица 1. Решение прямой задачи: пересчет первичной естественной остаточной намагниченности из древней в современную систему координат

Table 1. Solution of the direct problem: recalculation of the primary natural remanent magnetization from an ancient to a modern coordinate system

Точки отбора проб	Древняя система координат		Современная система координат					
			Вариант 1		Вариант 2		Вариант 3	
	J^0	D^0	J_1	D_1	J_2	D_2	J_3	D_3
I	-30	325	-24	294	-36	301	-13	288
II	-30	325	24	325	24	310	20	338
III	-30	325	-9	345	1	353	-21	338
IV	-30	325	-80	17	-83	275	-68	38

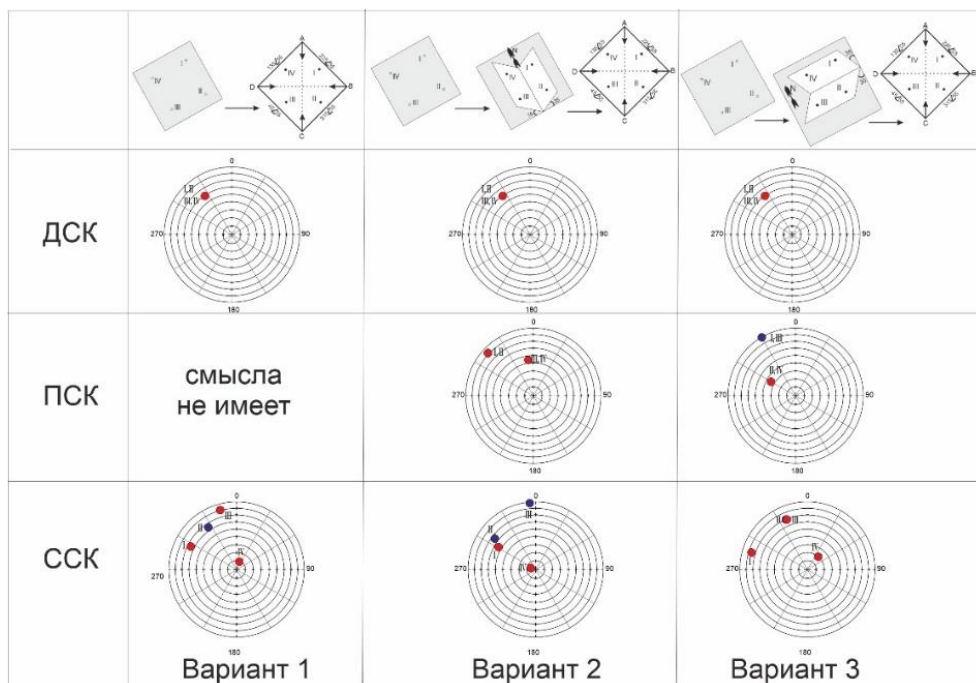


Рис. 3. Иллюстрация распределения векторов естественной остаточной намагниченности при решении прямой задачи (в соответствии с табл. 1)

Условные обозначения см. на рис. 1 и 2

Fig. 3. An image of natural remanent magnetization vector distribution when solving the direct problem (in accordance with Table 1)

See Figs. 1 and 2 for the legend



В качестве исходного примера для ее решения возьмем второй вариант прямой задачи (см. табл. 1), в котором заложено вращение крыльев складки вокруг горизонтальных осей сначала меридионального (широтное сжатие), а потом широтного (меридиональное сжатие) простира-ния (см. рис. 2, *b*).

Дано:

1) направление характеристической ЕОН ln^{ch} в ССК в ТОП (вариант 2 табл. 1):

$$(Dn, Jn) = \begin{cases} I = 301, -36; \\ II = 310, 24; \\ III = 353, 1; \\ IV = 275, -83; \end{cases}$$

2) современные азимут и угол падения пород в ТОП I, II, III и IV:

$$(Ar, Br) = \begin{cases} I = 225, 55; \\ II = 315, 55; \\ III = 45, 55; \\ IV = 135, 55; \end{cases}$$

3) современные азимут и угол падения шарниров складки в точках A, B, C и D:

$$(ar, br) = \begin{cases} A = 180, 45; \\ B = 270, 45; \\ C = 360, 45; \\ D = 90, 45. \end{cases}$$

Определить: направления первичной ЕОН $ln^0 (J^0, D^0)$ и метахронной ЕОН $ln^m (J^m, D^m)$ в ТОП I, II, III и IV.

Решение:

1) подобно пунктам 1–3 алгоритма, вычисляем промежуточные элементы залегания пород, исправленные за наклон шарниров для второго и третьего случая;

2) используем матричную формулу (2, а).

Результаты счета сводим в табл. 2 и выносим на стереограммы (рис. 4). В данном случае выбор решения соответствует последовательности тектонических поворотов второго варианта (согласно схеме, заложенной нами в исходные условия: сначала произошло широтное сжатие, а затем меридиональное (см. рис. 2, *b*)), поскольку кучность направлений характеристической ЕОН ln^{ch} в условных единицах составляет:

$$k_2 = 4 > k_1 = k_3 = k_4 = 2 > k_5 = k_{ССК} = 0.$$

Анализ материалов моделирования. Решения обратной задачи в палеомагнетизме, как и во всех других методах прикладной геофизики, многовариантны, но не бесконечны. Например, если при математическом моделировании для прямой задачи получилось три варианта (см. рис. 3), то в решении обратной задачи возможны уже десять вариантов: из них три варианта в ДСК, два варианта – в ПСК и пять вариантов для синскладчатой ЕОН (см. рис. 4).

Таблица 2. Решение обратной задачи в случае сохранности векторов первичной естественной остаточной намагниченности

Table 2. Solution of the inverse problem in the case of primary natural residual magnetization vector survival

Точки отбора проб	Современная система координат		Древняя система координат						Промежуточная система координат			
			Вариант 1		Вариант 2		Вариант 3		Вариант 4		Вариант 5	
	J_2	D_2	J^0	D^0	J^0	D^0	J^0	D^0	J^m	D^m	J^m	D^m
I	-36	301	-30	340	-30	325	-30	355	-7	315	-65	350
II	24	310	-30	310	-30	325	-30	295	-7	315	-12	307
III	1	353	-30	340	-30	325	-30	355	-44	350	6	356
IV	-83	275	-30	310	-30	325	-30	295	-44	350	-38	271
<i>k</i>	0		2		4		2		2		0	

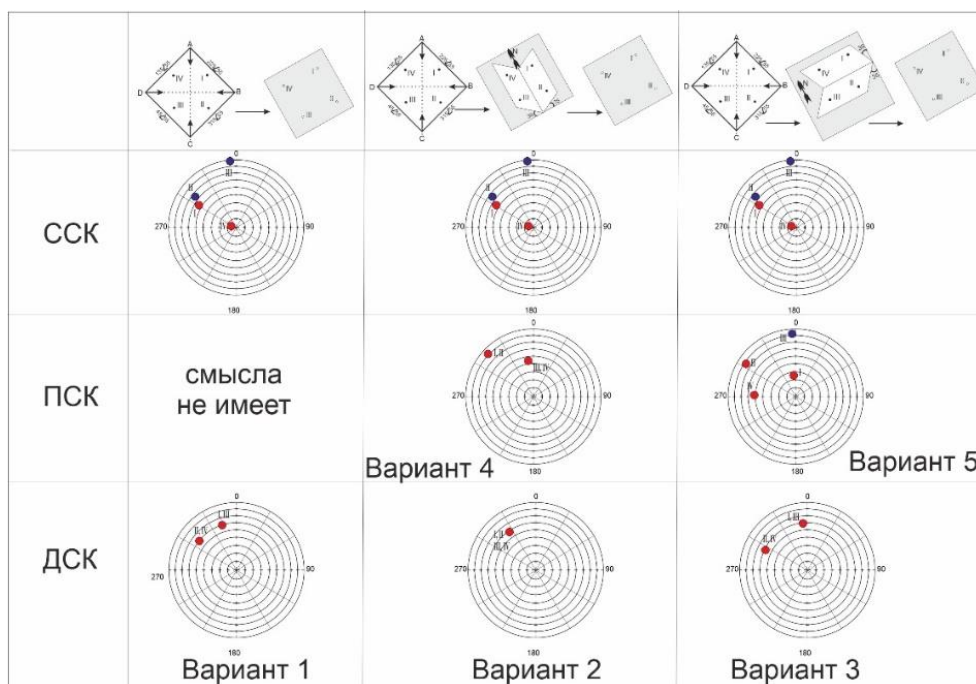


Рис. 4. Иллюстрация распределения векторов первичной естественной остаточной намагниченности при решении обратной задачи (в соответствии с табл. 2)

Условные обозначения см. на рис. 1–3

Fig. 4. An image of the primary natural remanent magnetization vector distribution when solving the inverse problem (in accordance with Table 2)

See Figs. 1–3 for the legend

Кроме того, для обратной задачи (см. рис. 4) следует отметить, что при отборе проб только из двух крыльев складки задача решается неоднозначно (тест складки неопределенный!). Например, в комбинации ТОП I и II (а также в других случаях, например, в паре ТОП III и IV) мы не сможем определить, первичная это или метакхронная ЕОН, так как условные кучности в том и другом случае $k_2 = k_4 = 2$. В связи с этим обязательным условием для применения теста складки в условиях сложной складчатости является опробование не менее чем из трех крыльев (см. рис. 2).

На основе данного алгоритма легко убедиться, что в случае с метакхронной ЕОН In^m : $(J^m, D^m) = (-30, 325)$, возникшей в промежуточную стадию складкообразования после меридионального сжатия, но до широтного (см. рис. 2, с), мы при тех же исходных данных современной структуры получим картину распределения векторов характеристической ЕОН In^{ch} , описанную в табл. 3 и на рис. 5:

$$k_5 = 4 > k_{ССК} = k_3 = 2 > k_1 = k_2 = k_4 = 0.$$

Из расчетов видно, что в ТОП I и II, а также III и IV без дополнительных данных по другим точкам определить, в какой системе координат и по какому из вариантов развиваются тектонические события, невозможно: кучности k для современных ЕОН (ССК) и метакхронных ЕОН (вариант 5) равны 2. Для пар ТОП II–III и I–IV совпадают варианты 3 и 5.

Кроме того, данный алгоритм при использовании современных модификаций тестов складок [19–22, 25–27] позволяет установить и синскладчатую (см. рис. 1, b) природу характеристической ЕОН In^{ch} , возникшую между двумя тектоническими этапами: в периоды от ССК до ПСК или от ПСК до ДСК.

В работе рассмотрен только частный случай, соответствующий изоклинальной складчатости с вертикальной осью вращения: угол $\gamma = 0$. Следует ожидать, что наклон оси складки (угол $\gamma > 0$), который может быть связан, например, с вращением вмещающего ее блока, согласно формуле (1), приведет к увеличению числа комбинаций углов α , β , γ (ведь априори неизвестно



Таблица 3. Решение обратной задачи в случае образования векторов метакронной естественной остаточной намагниченности в промежуточной стадии

Table 3. Solution of the inverse problem for the case of metachronous natural remanent magnetization vector formation in the intermediate stage

Точки отбора проб	Современная система координат		Древняя система координат						Промежуточная система координат			
			Вариант 1		Вариант 2		Вариант 3		Вариант 4		Вариант 5	
	J_2	D_2	J^0	D^0	J^0	D^0	J^0	D^0	J^m	D^m	J^m	D^m
I	0	315	0	315	0	300	0	330	30	305	-30	325
II	0	315	-55	315	-55	330	-55	300	-30	305	-30	325
III	-45	350	-55	285	-55	270	-55	300	-90	0	-30	325
IV	-45	350	0	345	0	0	0	330	0	0	-30	325
k	2		0		0		2		0		4	

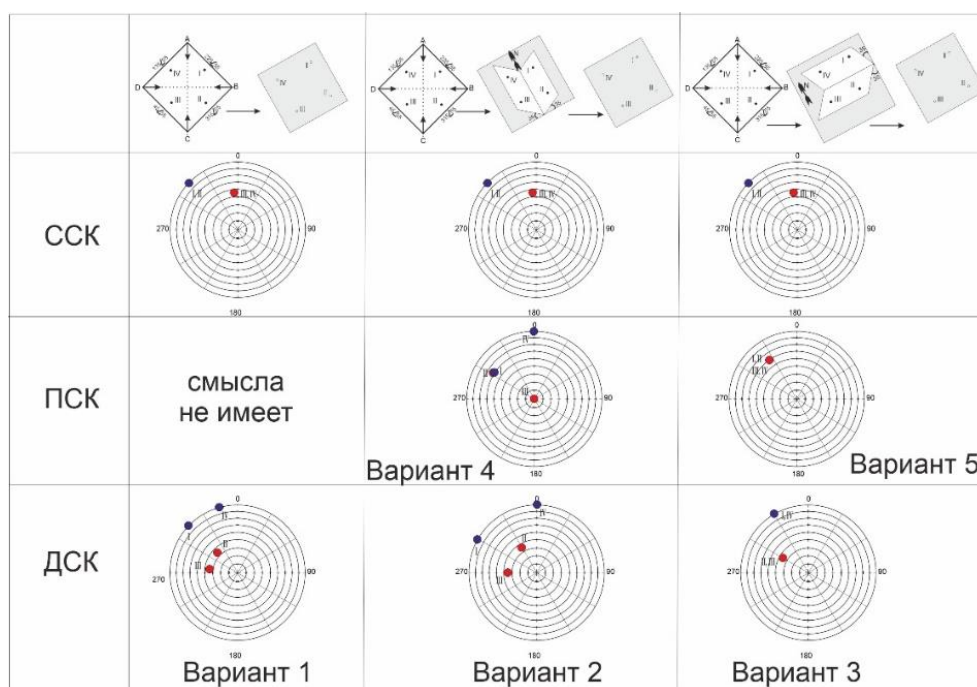


Рис. 5. Иллюстрация распределения векторов метакронной естественной остаточной намагниченности при решении обратной задачи (в соответствии с табл. 3)

Условные обозначения см. на рис. 1–3

Fig. 5. An image of metachronous natural remanent magnetization vector distribution when solving the inverse problem (in accordance with Table 3)

See Figs. 1–3 for the legend

время поворота блока, которое может пройти до, в процессе или после складчатости). В благоприятных случаях для этой цели может быть использована информация о тектоническом строении изучаемой площади.

Заключение

Математическое моделирование на примере динамической ФГМ формирования сложной складчатости показало, что:

1. По векторам характеристической ЕОН, сориентированным в современной системе координат, можно определить их возраст относительно этапов складчатости и в зависимости от этого полностью или частично восстановить количество, последовательность и направленность тектонических дислокаций.

2. Следует с особой тщательностью относиться к выбору и числу объектов палеомагнитных исследований (ТОП), а при математическом анализе компонентного состава ЕОН как можно



полнее использовать данные по структурной геологии. В противном случае либо тесты складки окажутся неопределенными, либо одна и та же характеристическая ЕОН образует некоторое подмножество «ложных» компонент.

3. Данный алгоритм совместим со всеми известными тестами складок.

4. Палеомагнитные исследования складчатой структуры желательно сочетать с изучением анизотропии магнитной восприимчивости, что, возможно, позволит определиться с природой векторов характеристической ЕОН: термоостаточной, пьезоостаточной или другими [35–37].

Список источников

1. Вахромеев Г.С., Давыденко А.Ю. Моделирование в разведочной геофизике: монография. М.: Недра, 1987. 192 с.
2. Константинов К.М. Динамические физико-геологические модели в решении геолого-геофизических задач // Вопросы естествознания. 2017. № 1. С. 55–63. EDN: ZOWRVF.
3. Константинов К.М., Яковлев А.А., Антонова Т.А., Константинов И.К., Ибрагимов Ш.З., Артёмов Е.В. Петро- и палеомагнитные характеристики структурно-вещественных комплексов месторождения алмазов трубка Нюрбинская (Среднемархинский район, Западная Якутия) // Геодинамика и тектонофизика. 2017. Т. 8. № 1. С. 135–169. <https://doi.org/10.5800/GT-2017-8-1-0235>. EDN: YPOZID.
4. Константинов К.М., Шибeko Е.А., Шульга В.В. Региональная динамическая физико-геологическая модель Сибирской платформы в позднем девоне – раннем карбоне: установление парастерической связи кимберлитов и углеводородообразования. Геофизика. 2020. № 3. С. 62–71. EDN: XPKXTP.
5. Вайн Ф., Метьюз Д. Магнитные аномалии над океаническими хребтами // Новая глобальная тектоника (тектоника плит): сб. статей / ред. Л.П. Зоненшайн, А.А. Ковалев. М.: Мир, 1974. С. 32–37.
6. Храмов А.Н., Гончаров Г.И., Комиссарова Р.А., Писаревский С.А., Погарская И.А., Ржевский Ю.С. [и др.]. Палеомагнитология / ред. А.Н. Храмов. Л.: Недра, 1982. 312 с.
7. Кравчинский А.Я. Палеомагнитные и палеогеографические перестройки на докембрийских платформах. М.: Недра, 1977. 95 с.
8. Кравчинский А.Я. Палеомагнетизм и палеогеографическая эволюция континентов. Новосибирск: Наука, 1979. 264 с.
9. Scotese C.R., McKerrow W.S. Revised World maps and introduction // Geological Society, London, Memoirs. 1990. Vol. 12. P. 1–21. <https://doi.org/10.1144/gsl.mem.1990.012.01.01>.
10. Жандалинов В.М., Константинов К.М. Электродинамические и геодинамические аспекты кимберлитобразования // Наука и образование. 2011. № 1. С. 45–50. EDN: NEEWTH.
11. Константинов К.М., Томшин М.Д., Константинов И.К., Яковлев А.А. Палеомагнетизм среднепалеозойских базитов юго-восточного борта Вилуйского палеорифта // Доклады Академии наук. 2019. Т. 486. № 5. С. 607–612. <https://doi.org/10.31857/S0869-56524865607-612>. EDN: OQAUEM.
12. Константинов К.М., Хороших М.С., Старкова Т.С., Лисковая Л.В., Кузина Д.М. Минералы-носители естественной остаточной намагниченности кимберлитов трубки Нюрбинская (Якутская алмазоносная провинция) // Геофизика. 2019. № 3. С. 15–26. EDN: NAUXVQ.
13. Butler R.F. Paleomagnetism: magnetic domains to geologic terrains. Oxford: Backwell Sci. Publ., 1992. 319 p.
14. Zijderfeld J.D.A. Demagnetization of rocks, analysis of results // Methods in paleomagnetism / eds. D.W. Collinson, K.M. Creer, S.K. Runcorn. Amsterdam: Elsevier, 1967. P. 254–286.
15. Житков А.Н. Математический аппарат пространственных вращений в задачах палеомагнитологии и геодинамики // Геофизические исследования Восточной Сибири на современном этапе: сб. науч. тр. Иркутск: ВостсибНИИГГиМС, 1990. С. 110–129.
16. Житков А.Н., Винарский Я.С. Матричный аппарат пространственных вращений в задачах палеомагнитологии // Обеспечение научно-технического прогресса при геофизических исследованиях в Восточной Сибири: сб. науч. тр. Иркутск: СНИИГГиМС, 1987. С. 139–141.
17. Храмов А.Н., Шолло Л.Е. Палеомагнетизм: принципы, методы и геологические приложения палеомагнитологии. Л.: Недра, 1967. 251 с.
18. Fisher R.A. Dispersion on a sphere // Proceedings of the Royal Society A. 1953. Vol. 217. Iss. 1130. P. 295–305. <https://doi.org/10.1098/rspa.1953.0064>.
19. Шипунов С.В. Выделение компонент многокомпонентной естественной остаточной намагниченности при палеомагнитных исследованиях // Палеомагнетизм и аккреционная тектоника: сб. науч. тр. / ред. А.Н. Храмов. Л.: ВНИГРИ, 1988. С. 173–185.
20. Баженов М.Л., Шипунов С.В. Метод складки в палеомагнетизме // Известия Академии наук СССР. Физика Земли. 1988. № 7. С. 89–101.
21. Шипунов С.В. Новый тест складки в палеомагнетизме (реабилитация теста выравнивания) // Физика Земли. 1995. № 4. С. 67–74.



22. Shipunov S.V. Synfolding magnetization: detection, testing and geological applications // *Geophysical Journal International*. 1997. Vol. 130. Iss. 2. P. 405–410. <https://doi.org/10.1111/j.1365-246X.1997.tb05656.x>.
23. Bazhenov M.L., Shipunov S.V. Fold test in paleomagnetism: new approaches and reappraisal of data // *Earth and Planetary Science Letters*. 1991. Vol. 104. Iss. 1. P. 16–24. [https://doi.org/10.1016/0012-821X\(91\)90233-8](https://doi.org/10.1016/0012-821X(91)90233-8).
24. Enkin R.J. The direction-correction tilt test: an all-purpose tilt/fold test for paleomagnetic studies // *Earth and Planetary Science Letters*. 2003. Vol. 212. Iss. 1-2. P. 151–166. [https://doi.org/10.1016/S0012-821X\(03\)00238-3](https://doi.org/10.1016/S0012-821X(03)00238-3).
25. Graham J.W. The stability and significance of magnetism in sedimentary rocks // *Journal of Geophysical Research*. 1949. Vol. 54. Iss. 2. P. 131–167. <https://doi.org/10.1029/JZ054i002p00131>.
26. McFadden P.L. A new fold test for palaeomagnetic studies // *Geophysical Journal International*. 1990. Vol. 103. Iss. 1. P. 163–169. <https://doi.org/10.1111/j.1365-246X.1990.tb01761.x>.
27. McFadden P.L., Jones D.L. The fold test in palaeomagnetism // *Geophysical Journal of the Royal Astronomical Society*. 1981. Vol. 67. Iss. 1. P. 53–58. <https://doi.org/10.1111/j.1365-246X.1981.tb02731.x>.
28. McElhinny M.W. Statistical significance of the fold test in palaeomagnetism // *Geophysical Journal of the Royal Astronomical Society*. 1964. Vol. 8. Iss. 3. P. 338–340. <https://doi.org/10.1111/j.1365-246X.1964.tb06300.x>.
29. Watson G.S. A test for randomness of directions // *Geophysical Supplements to the Monthly Notices of the Royal Astronomical Society*. 1956. Vol. 7. Iss. 4. P. 160–161. <https://doi.org/10.1111/j.1365-246X.1956.tb05561.x>.
30. Watson G.S., Enkin R.J. The fold test in paleomagnetism as a parameter estimation problem // *Geophysical Research Letters*. 1993. Vol. 20. Iss. 19. P. 2135–2137. <https://doi.org/10.1029/93GL01901>.
31. Винарский Я.С., Житков А.Н., Кравчинский А.Я. Алгоритмы и программы. Вып. 10 (99): Автоматизированная система обработки палеомагнитных данных ОПАЛ. М.: ВИЭМС, 1987. 89 с.
32. Кравчинский А.Я., Житков А.Н., Винарский Я.С., Кравчинский В.А., Константинов К.М. Применение системы ОПАЛ-1 при палеомагнитных исследованиях // *Магнитные свойства минералов и проблемы палеомагнетизма и петромагнетизма: сб. науч. тр. Магадан: СКВНИИ ДВО АН СССР, 1990. С. 191.*
33. Константинов К.М. Способ реконструкции последовательности тектонических дислокаций горных пород по векторам естественной остаточной намагниченности // *Палеомагнетизм и магнетизм горных пород: материалы семинара (г. Борок, 11–13 октября 2003 г.)*. М.: ГЕОС, 2003. С. 32–34.
34. Константинов К.М. Математическое моделирование сложных деформаций горных пород по векторам характеристической естественной остаточной намагниченности // *Геофизика*. 2005. № 6. С. 60–65. EDN: SQRDOL.
35. Завойский В.Н. Использование тензора магнитной восприимчивости для решения задач структурной геологии // *Физика Земли*. 1982. № 3. С. 76–84.
36. Константинов К.М., Артёмова Е.В., Константинов И.К., Яковлев А.А., Киргуев А.А. Возможности метода анизотропии магнитной восприимчивости в решении геолого-геофизических задач поисков коренных месторождений алмазов. *Геофизика*. 2018. № 1. С. 67–77. EDN: YWMSHU.
37. Tarling D.H., Hrouda F. The magnetic anisotropy of rocks. London: Chapman & Hall, 1993. 217 p.

References

1. Vakhromeev G.S., Davydenko A.Yu. *Modeling in exploration geophysics*. Moscow: Nedra; 1987, 192 p. (In Russ.).
2. Konstantinov K.M. Dynamic physical-geological models in solving geological-geophysical problems. *Voprosy estestvoznaniya*. 2017;1:55-63. (In Russ.). EDN: ZOWRVF.
3. Konstantinov K.M., Yakovlev A.A., Antonova T.A., Konstantinov I.K., Ibragimov S.Z., Artemova E.V. Petro- and paleomagnetic characteristics of the structural–material complexes of the diamond mining of the Nyurbinskaya pipe (Middle Markha district, West Yakutia). *Geodinamika i tektonofizika = Geodynamics & Tectonophysics*. 2017;8(1):135-169. (In Russ.). <https://doi.org/10.5800/GT-2017-8-1-0235>. EDN: YPOZID.
4. Konstantinov K.M., Shibeko E.A., Shulga V.V. Regional dynamic physical-geological model of the Siberian platform in Late Devonian – Early Carboniferous periods: establishing of parasteric correlation between kimberlite and hydrocarbon formations. *Geofizika = Geophysics*. 2020;3:62-71. (In Russ.). EDN: XPKXTP.
5. Vine F., Matthews D. Magnetic anomalies over oceanic ridges. In: Zonenshain L.P., Kovalev A.A. (eds.). *Novaya global'naya tektonika (tektonika plit) = New global tectonics (plate tectonics)*. Moscow: Mir; 1974, p. 32-37. (In Russ.).
6. Khramov A.N., Goncharov G.I., Komissarova R.A., Pisarevskii S.A., Pogarskaya I.A., Rzhnevskii Yu.S., et al. *Paleomagnetology*. Leningrad: Nedra; 1982, 312 p. (In Russ.).
7. Kravchinskii A.Ya. *Paleomagnetic and paleogeographic rearrangements on Precambrian platforms*. Moscow: Nedra; 1977, 95 p. (In Russ.).
8. Kravchinskii A.Ya. *Paleomagnetism and paleogeographic evolution of continents*. Novosibirsk: Nauka; 1979, 264 p. (In Russ.).
9. Scotese C.R., McKerrow W.S. Revised World maps and introduction. *Geological Society, London, Memoirs*. 1990;12:1-21. <https://doi.org/10.1144/gsl.mem.1990.012.01.01>.
10. Zhandalinov V.M., Konstantinov K.M. Electrodynamical and geodynamic aspects of kimberlite formation. *Nauka i obrazovanie*. 2011;1:45-50. (In Russ.). EDN: NEEWTH.



11. Konstantinov K.M., Tomshin M.D., Konstantinov I.K., Yakovlev A.A. Paleomagnetism of Middle Paleozoic mafic rocks of the southeastern side of the Vilyui paleorift. *Doklady Akademii nauk*. 2019;486(5):607-612. (In Russ.). <https://doi.org/10.31857/S0869-56524865607-612>. EDN: OQAUEM.
12. Konstantinov K.M., Khoroshikh M.S., Starkova T.S., Liskovaya L.V., Kuzina D.M. Minerals of the natural remanent magnetization of kimberlites of the pipe Nyurbinskaya (Yakut diamondiferous province). *Geofizika = Geophysics*. 2019;3:15-26. (In Russ.). EDN: NAUXVQ.
13. Butler R.F. *Paleomagnetism: magnetic domains to geologic terrains*. Oxford: Backwell Sci. Publ.; 1992, 319 p.
14. Zijderveld J.D.A. Demagnetization of rocks, analysis of results. In: Collinson D.W., Creer K.M., Runcorn S.K. (eds.). *Methods in paleomagnetism*. Amsterdam: Elsevier; 1967, p. 254-286.
15. Zhitkov A.N. Mathematical apparatus of spatial rotations in the problems of paleomagnetology and geodynamics. In: *Geofizicheskie issledovaniya Vostochnoi Sibiri na sovremennom etape = Geophysical studies of Eastern Siberia at the present stage*. Irkutsk: East Siberian Research Institute of Geology, Geophysics and Mineral Resources; 1990, p. 110-129. (In Russ.).
16. Zhitkov A.N., Vinarskii Ya.S. Matrix apparatus of spatial rotations in paleomagnetological problems. In: *Obespechenie nauchno-tekhnicheskogo progressa pri geofizicheskikh issledovaniyakh v Vostochnoi Sibiri = Provision of scientific and technical progress in geophysical research in Eastern Siberia*. Irkutsk: Siberian Research Institute of Geology, Geophysics and Mineral Resources; 1987, p. 139-141. (In Russ.).
17. Khramov A.N., Sholpo L.E. *Palaeomagnetism: principles, methods and geological applications of paleomagnetology*. Leningrad: Nedra; 1967, 251 p. (In Russ.).
18. Fisher R.A. Dispersion on a sphere. *Proceedings of the Royal Society A*. 1953;217(1130):295-305. <https://doi.org/10.1098/rspa.1953.0064>.
19. Shipunov S.V. Identification of components of multicomponent natural remanent magnetization during paleomagnetic studies. In: Khramov A.N. (eds.). *Paleomagnetizm i akkretionnaya tektonika = Paleomagnetism and accretionary tectonics*. Leningrad: All-Russian Petroleum Research and Exploration Institute; 1988, p. 173-185. (In Russ.).
20. Bazhenov M.L., Shipunov S.V. Fold method in paleomagnetism. *Izvestiya Akademii nauk SSSR. Fizika Zemli*. 1988;7:89-101. (In Russ.).
21. Shipunov S.V. New fold test in paleomagnetism (alignment test rehabilitation). *Fizika Zemli*. 1995;4:67-74. (In Russ.).
22. Shipunov S.V. Synfolding magnetization: detection, testing and geological applications. *Geophysical Journal International*. 1997;130(2):405-410. <https://doi.org/10.1111/j.1365-246X.1997.tb05656.x>.
23. Bazhenov M.L., Shipunov S.V. Fold test in paleomagnetism: new approaches and reappraisal of data. *Earth and Planetary Science Letters*. 1991;104(1):16-24. [https://doi.org/10.1016/0012-821X\(91\)90233-8](https://doi.org/10.1016/0012-821X(91)90233-8).
24. Enkin R.J. The direction-correction tilt test: an all-purpose tilt/fold test for paleomagnetic studies. *Earth and Planetary Science Letters*. 2003;212(1-2):151-166. [https://doi.org/10.1016/S0012-821X\(03\)00238-3](https://doi.org/10.1016/S0012-821X(03)00238-3).
25. Graham J.W. The stability and significance of magnetism in sedimentary rocks. *Journal of Geophysical Research*. 1949;54(2):131-167. <https://doi.org/10.1029/JZ054i002p00131>.
26. McFadden P.L. A new fold test for palaeomagnetic studies. *Geophysical Journal International*. 1990;103(1):163-169. <https://doi.org/10.1111/j.1365-246X.1990.tb01761.x>.
27. McFadden P.L., Jones D.L. The fold test in palaeomagnetism. *Geophysical Journal of the Royal Astronomical Society*. 1981;67(1):53-58. <https://doi.org/10.1111/j.1365-246X.1981.tb02731.x>.
28. McElhinny M.W. Statistical significance of the fold test in palaeomagnetism. *Geophysical Journal of the Royal Astronomical Society*. 1964;8(3):338-340. <https://doi.org/10.1111/j.1365-246X.1964.tb06300.x>.
29. Watson G.S. A test for randomness of directions. *Geophysical Supplements to the Monthly Notices of the Royal Astronomical Society*. 1956;7(4):160-161. <https://doi.org/10.1111/j.1365-246X.1956.tb05561.x>.
30. Watson G.S., Enkin R.J. The fold test in paleomagnetism as a parameter estimation problem. *Geophysical Research Letters*. 1993;20(19):2135-2137. <https://doi.org/10.1029/93GL01901>.
31. Vinarskii Ya.S., Zhitkov A.N., Kravchinskii A.Ya. *Algorithms and programs*. Iss. 10 (99): *OPAL automated system for processing paleomagnetic data*. Moscow: All-Union Institute of Economy of Mineral Raw Materials and Geological Exploration; 1987, 89 p. (In Russ.).
32. Kravchinskii A.Ya., Zhitkov A.N., Vinarskii Ya.S., Kravchinskii V.A., Konstantinov K.M. OPAL-1 system application in paleomagnetic studies. In: *Magnitnye svoystva mineralov i problemy paleomagnetizma i petromagnetizma = Magnetic properties of minerals and problems of paleomagnetism and petromagnetism*. Magadan: North-Eastern Integrated Research Institute of the Far Eastern Branch of the USSR Academy of Sciences; 1990, p. 191. (In Russ.).
33. Konstantinov K.M. Reconstruction method of rock tectonic dislocation sequence by the vectors of natural remanent magnetization. In: *Paleomagnetizm i magnetizm gornykh porod: materialy seminara = Paleomagnetism and magnetism of rocks: proceedings of the seminar*. 11-13 October 2003, Borok. Moscow: GEOS; 2003, p. 32-34. (In Russ.).
34. Konstantinov K.M. Mathematical modeling of complex rock deformations by vectors of characteristic natural remanent magnetization. *Geofizika = Geophysics*. 2005;6:60-65. (In Russ.). EDN: SQRDOL.
35. Zavoiskii V.N. Using magnetic susceptibility tensor to solve structural geology problems. *Fizika Zemli*. 1982;3:76-84. (In Russ.).



36. Konstantinov K.M., Artemova E.V., Konstantinov I.K., Yakovlev A.A., Kirguez A.A. Possibilities of the method of anisotropy of magnetic susceptibility in the solution of geologic-geophysical problems of search radical diamond fields. *Geofizika = Geophysics*. 2018;1:67-77. (In Russ.). EDN: YWMSHU.

37. Tarling D.H., Hrouda F. *The magnetic anisotropy of rocks*. London: Chapman & Hall; 1993, 217 p.

Информация об авторе / Information about the author



Константинов Константин Михайлович,
доктор геолого-минералогических наук,
руководитель департамента геофизики,
институт «Сибирская школа геонаук»,
Иркутский национальный исследовательский технический университет,
г. Иркутск, Россия,
старший научный сотрудник Лаборатории геологии месторождений,
Институт земной коры СО РАН,
г. Иркутск, Россия,
✉ konstantinovkm@ex.istu.edu
<https://orcid.org/0000-0002-1196-8776>
Konstantin M. Konstantinov,
Dr. Sci. (Geol. & Mineral.),
Head of the Geophysics Department,
Siberian School of Geosciences,
Irkutsk National Research Technical University,
Irkutsk, Russia,
Senior Researcher of the Mining Geology Laboratory,
Institute of the Earth's Crust SB RAS,
Irkutsk, Russia,
✉ konstantinovkm@ex.istu.edu
<https://orcid.org/0000-0002-1196-8776>

Вклад автора / Contribution of the author

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

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

Конфликт интересов / Conflict of interests

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

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

Информация о статье / Information about the article

Статья поступила в редакцию 14.08.2023; одобрена после рецензирования 04.09.2023; принята к публикации 20.09.2023.

The article was submitted 14.08.2023; approved after reviewing 04.09.2023; accepted for publication 20.09.2023.

ГЕОЛОГИЯ, ПОИСКИ И РАЗВЕДКА ТВЕРДЫХ
ПОЛЕЗНЫХ ИСКОПАЕМЫХ, МИНЕРАГЕНИЯ

Научная статья

УДК 544.774+66.04

EDN: KVLBYX

DOI: 10.21285/2686-9993-2023-46-3-306-314



Характеристики прибрежных песков на территории Вьетнама

А.А. Яковлева^a, М.В. Константинова^b, Е.А. Гусева^c^{a-c}Иркутский национальный исследовательский технический университет, г. Иркутск, Россия

Резюме. Целью представленной работы стало детальное определение характеристик прибрежных песков Вьетнама для последующего изучения их сорбционной способности. Объектами исследования служили пробы песков, отобранные на побережье рек Хонг (вблизи столицы г. Ханой), Тхубон (провинция Куангнам), Тхачхан (провинция Куангчи) и на побережье моря (вблизи г. Хатинь). В этих местах находятся разнообразные промышленные и сельскохозяйственные предприятия, а также активно развивается туристический бизнес. Предметом исследования служили гранулометрические характеристики песка и его минералогический состав. Для изучения минералогического состава проб песков применялся метод рентгенографического фазового анализа, который на основании полученных рентгенограмм позволяет определить минералогический состав изучаемых проб. Установлено, что в их составе преобладает минерал α -кварц SiO_2 , а также содержится некоторое количество α -корунда Al_2O_3 и прочих примесей. Для исследования гранулометрических характеристик песков применялся стандартный метод ситового анализа. В работе были определены доли различных фракций проб песка, средний размер зерен и коэффициент однородности, насыпной вес и величина пористости, а также величина удельной поверхности песка.

Ключевые слова: песок, рентгенография, гранулометрия, минералогический состав, пористость, объемный вес

Для цитирования: Яковлева А.А., Константинова М.В., Гусева Е.А. Характеристики прибрежных песков на территории Вьетнама // Науки о Земле и недропользование. 2023. Т. 46. № 3. С. 306–314. <https://doi.org/10.21285/2686-9993-2023-46-3-306-314>. EDN: KVLBYX.

GEOLOGY, PROSPECTING AND EXPLORATION
OF SOLID MINERALS, MINERAGENCY

Original article

Characteristics of coastal sands in Vietnam

Ariadna A. Yakovleva^a, Marina V. Konstantinova^b, Elena A. Guseva^c^{a-c}Irkutsk National Research Technical University, Irkutsk, Russia

Abstract. The purpose of the presented work is a thorough determination of the characteristics of the coastal sands in Vietnam for the subsequent study of their sorption capacity. The objects of the study are sand samples collected on the banks of the Hong River (near the capital Hanoi), ThuBon (Quang Nam Province), Thachhan (Quangchi Province) and on the sea coast near the city of Hatin. Various industrial and agricultural enterprises are located in these places, in addition, the travel industry is actively developing here. The subject of the study is the granulometric characteristics of sand and its mineralogical composition. To study the mineralogical composition of sand samples the method of X-ray phase analysis is used, which allows to determine the mineralogical composition of the studied samples on the basis of the X-ray images obtained. It has been found that the mineral α -quartz SiO_2 prevails in their composition, and there is also a certain amount of α -corundum Al_2O_3 as well as other impurities. To study the granulometric characteristics of the sands, the standard method of sieve analysis is used. The proportions of various fractions of sand samples, the average grain size, uniformity coefficient, bulk weight, porosity, as well as the specific surface area have been determined.

Keywords: sand, radiography, granulometry, mineralogical composition, porosity, bulk weight



For citation: Yakovleva A.A., Konstantinova M.V., Guseva E.A. Characteristics of coastal sands in Vietnam. *Nauki o Zemle i nedropol'zovanie* = *Earth sciences and subsoil use*. 2023;46(3):306-314. (In Russ.). <https://doi.org/10.21285/2686-9993-2023-46-3-306-314>. EDN: KVLBYX.

Введение

Разнообразные свойства песка, в том числе химическая инертность, неизменность состава и высокая механическая прочность, предопределили его широкое практическое использование. Подавляющее количество добываемого песка используется в таких областях, как стекольная промышленность, строительство дорог, металлургия, промышленное и гражданское строительство и пр.¹ [1]. В связи с огромными объемами добычи песка наблюдается неизбежное нарушение баланса биосферы, необратимые изменения ландшафтов, что негативно сказывается на экологии в целом [2, 3].

Песок является одним из видов сыпучих отложений, различных по генезису, которые представляют собой обломки разнообразных минералов различной степени дисперсности и окатанности. Он является уникальным фильтрующим материалом, способным поглощать и задерживать вредные вещества. Благодаря этому песок активно используется при фильтрации воды во многих производственных процессах, очистке подвергается не только питьевая вода, но также и технологические и отработанные сточные воды [4–11].

В природе пески часто являются естественными барьерами, тормозящими распространение загрязнений, таких как загрязнения тяжелыми металлами, поверхностно-активными веществами, разнообразными продуктами жизнедеятельности человека, включая техногенные поллютанты, и позволяют сохранять первозданность природных экосистем. Во многом это определяется сорбционными и поглощающими свойствами песков, которые, в свою очередь, зависят от различных физико-химических характеристик песка: его состава, крупности, насыпного веса, пористости и пр. В связи с этим изучение песков представляет определенный научный интерес. Сорбционную способность песков можно отнести к их биосферной функции, поскольку они пред-

ставляют собой определенный барьер на пути загрязнителей, которые, попадая в грунтовые и поверхностные воды, тем самым вовлекаются в малый биологический и большой геологический круговороты. Это является актуальным, с одной стороны, для регионов, имеющих существенную техногенную нагрузку, а с другой – для тех рекреационных мест, в отношении которых особенно важно сохранение экологии. Все это определяет особое внимание к вопросу об изучении сорбционных характеристик песков.

Закономерности физико-химические явлений, протекающих на поверхности песка, в частности адсорбции, определяются различными факторами, среди которых важнейшее место занимают свойства песка, такие как минеральный состав, гранулометрические характеристики и пр. Ведущим фактором в формировании речных песчаных отложений является гидродинамика водного потока, определяющая взаимодействие его с руслом, по этой причине пески равнинных рек существенно отличаются от аллювия горных [12–14]. Морские пески образуются не только посредством выветривания, но являются и результатом течения рек, которое несет с собой песок, следствием ударов волн о прибрежные скалы, а также продуктом вулканической деятельности.

Материалы и методы исследования

Объектами исследования явились пробы песка, отобранные в отдельных местах на территории Вьетнама (рис. 1).

Пробы песка 1 были отобраны на берегах реки Хонг вблизи столицы Вьетнама г. Ханой, песка 2 – на берегу реки Тхубон в провинции Куангнам, песка 3 – на морском пляже вблизи г. Хатинь, песка 4 – на берегу реки Тхачхан в провинции Куангчи. В этих местах находятся разнообразные промышленные и сельскохозяйственные предприятия, а также активно развивается туристический бизнес.

¹ Рыбьев И.А. Строительное материаловедение: учебник для среднего проф. образования. В 2 ч. Ч. 2. М.: Юрайт, 2023. 429 с.



Рис. 1. Места отбора проб песка
Fig. 1. Sand sampling sites

Предметом исследования являлся минералогический состав песка, его гранулометрические характеристики.

Для достижения результата в работе использовалось несколько видов анализа и методов определения различных характеристик.

Рентгенофазовый анализ. Минералогический состав проб песка производили с использованием метода рентгенофазового анализа, суть которого состоит в дифракции рентгеновских лучей. По положению пиков на дифрактограмме, исходя из количества и высоты пика или площади пика, можно осуществить качественный и количественный минералогический анализ материала [15]. Дифрактограммы получены с использованием рентгеновского энергодисперсионного дифрактометра XRD-7000 X-ray (Shimadzu, Япония) при нормальных атмосферных условиях.

Ситовой анализ. Для оценки гранулометрических характеристик сыпучих материалов, как правило, используется стандартный ме-

тод ситового анализа. Этот метод состоит в том, что материал просеивается на ситах с различным диаметром ячеек. Массу полученных фракций определяли взвешиванием на аналитических весах. В ходе опытов определяется относительное содержание фракций, каждая из которых характеризуется более узким диапазоном размеров частицы.

Определение объемной массы. Расчет объемной массы производили по результатам определения массы точно отмеренного объема песка взвешиванием его на аналитических весах².

Определение пористости. Расчет пористости песков производили по результатам эксперимента по насыщению пробы песка водой. Совокупный объем пор принимали равным количеству воды, необходимому для насыщения песка³.

Определение удельной площади поверхности песка. С этой целью использовали метод адсорбции метиленового голубого из вод-

² Дмитриев В.В., Ярг Л.А. Методы и качество лабораторного изучения грунтов: учеб. пособие. М.: КДУ, 2008. 543 с.

³ Там же.



ного раствора. Данный метод основан на экспериментальном определении концентрации водного раствора метиленового голубого до адсорбции песком и после его адсорбции с последующим расчетом величины удельной площади поверхности песка^{4,5} [16]. Для определения концентрации метиленового голубого применяли спектрофотометрический метод с использованием спектрофотометра ПЭ-5400В отечественного производства.

Результаты исследования и их обсуждение

Минералогический состав. При проведении рентгенофазового анализа для всех проб были получены схожие по виду дифрактограммы. Это свидетельствует о том, что минералогические составы песков являются близкими. Данный анализ показал, что в составе песков превалирует α -кварц SiO_2 . Содержание α -корунда Al_2O_3 и прочих примесей гораздо меньше (табл. 1).

Чувствительность рентгенофазового анализа не позволяет выявить в составе проб песка природу примесей, содержащихся в этих образцах, поскольку их количество очень мало (меньше 1 %). Тем не менее на качественном уровне по виду дифрактограмм можно сказать, что минимальное количество

прочих примесей отмечено в пробе 3, максимальное – в пробе 4.

По содержанию α -кварца можно объединить схожие пески проб 1 и 3, в которых корунда и примесных минералов мало, а также пески проб 2 и 4, в которых их доля составляет около 10 %.

Гранулометрический состав. Известно, что на фильтрующую и сорбционную способность сыпучих материалов влияет удельная площадь поверхности, размеры зерен и коэффициент их однородности, пористость материалов.

Перед проведением эксперимента проводили квартование, а для последующей оценки распределения частиц по размерам применяли ситовой анализ⁶. Принцип ситового анализа состоит во взвешивании материала, остающегося на каждом сите после просеивания.

Использовали стандартный набор из шести сит с диаметром отверстий 2, 1, 0,5, 0,25, 0,125 и 0,063 мм.

В табл. 2 в качестве примера представлены результаты ситового анализа для пробы песка 1, а также расчетные значения процентного содержания фракций.

На основании расчетных данных табл. 2 построен график распределения частиц песков по размерам (рис. 2).

Таблица 1. Характеристика кристаллического строения песков из Вьетнама
Table 1. Characteristics of the crystal structure of Vietnam's sands

Минерал	Формула минерала	Содержание минералов в песках, %			
		Проба 1	Проба 2	Проба 3	Проба 4
α -кварц	SiO_2	98,38	89,93	98,99	89,11
α -корунд и примеси	Al_2O_3	1,62	10,07	1,01	10,89

Таблица 2. Фракционный состав песка (проба песка 1)
Table 2. Fractional composition of sand (sand sample 1)

Характеристика	Фракция песка, мм					
	+2	+1-2	+0,5-1	+0,25-0,5	+0,125-0,25	+0,063-0,125
Масса фракции, г	30	36,5	73	394,5	291	19,5
Содержание фракции, %	3,55	4,32	8,64	46,71	34,46	2,31
Массовая доля частиц размером меньше ячейки, %	96,45	92,13	83,48	36,77	2,31	0

⁴ Вячеславов, А.С., Ефремова М. Определение площади поверхности и пористости материалов методом сорбции газов: методическая разработка. М.: МГУ, 2011. 65 с.

⁵ ГОСТ 13144-79. Графит. Методы определения удельной поверхности. М.: Изд-во стандартов, 1979. 7 с.

⁶ ГОСТ 12536-79. Грунты. Методы лабораторного определения зернового (гранулометрического) и микроагрегатного состава. М.: Стандартинформ, 1979. 16 с.

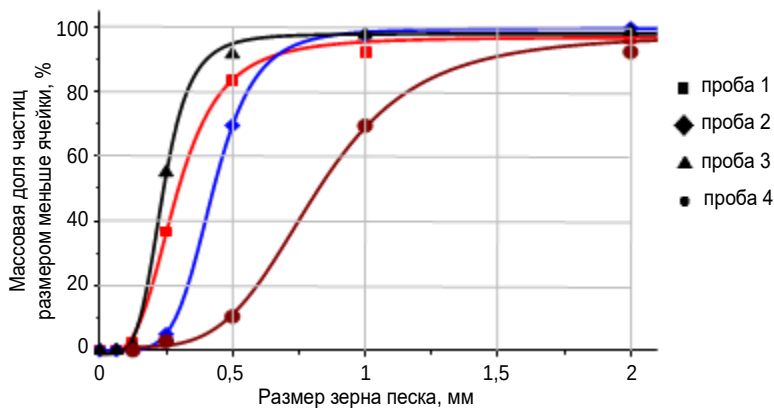


Рис. 2. Кривые распределения частиц по размерам
Fig. 2. Particle size distribution curves

Средний размер зерна песка d_{cp} соответствует размеру отверстий сита, через которое проходит около 50 % пробы⁷. Для определения коэффициента однородности r необходимо определить процент частиц размером от $2/3d_{cp}$ до $4/3d_{cp}$. Обработку результатов с целью расчета значения среднего размера зерна d_{cp} производили с использованием программы Origin Lab 8.5 [17].

Результат обработки показал заметный разброс расчетных характеристик. Наиболее дисперсными являются пробы песка 1 и 3 (средний размер зерна 0,241 и 0,294 мм соответственно). Наиболее крупнозернистой является проба 4, средний размер зерна в которой составляет 0,849 мм. Для пробы 2 средний размер зерна составляет 0,429 мм. Коэффициент однородности r для пробы 1 – 53,12, для пробы 2 – 72,24, для пробы 3 – 66,92, для пробы 4 – 61,37 %.

Представленные результаты говорят о том, что пробы песков из разных точек отбора обладают различными размерами зерен, а также отличаются по однородности.

Пористость. Поры в песке представляют собой как свободные пространства между зёрнами песка, так и пространства в самих песчинках. Общий объем всех пор характеризуется такой величиной, как пористость. Величина пористости определяется как отношение общего

объема пор в сыпучем материале ко всему объему материала, выраженное в процентах.

Определение пористости песков производили методом насыщения песка водой^{8,9}. Замеряли точный объем емкости (около 50 см³), наполняли ее песком вровень с краями. Точный объем воды определяли с использованием бюретки. Завершали насыщение после появления на поверхности тонкой бликующей на свету водной пленки. Общий объем затраченной воды соответствует объему всех пор.

Определение объемной массы. Величина объемной массы песка (насыпной массы или плотности) δ представляет собой массу единицы объема песка¹⁰:

$$\delta = (m_1 - m_0) / V,$$

где m_0 – масса пустого бьюкса, г; m_1 – масса бьюкса, заполненного песком, г; V – объем бьюкса, см³.

Объемную массу песков можно определять при рыхлом или при плотном сложении¹¹. При рыхлом сложении песков вычисляли объемную массу песка δ_{min} , то есть минимальное значение объемной массы, насыпая песок в бьюкс. Объемную массу песка при плотном сложении δ_{max} , то есть максимальное значение объемной массы, определяли, предварительно утрамбовывая песок в бьюксе.

В табл. 3 приведены объемные массы δ_{min} и δ_{max} при рыхлом и плотном сложении.

⁷ ГОСТ 29234.3-91. Пески формовочные. Метод определения среднего размера зерна и коэффициента однородности. М.: Стандартинформ, 2008. 5 с.

⁸ Смирнова А.Я., Бабкина О.А. Практическая гидрогеология: учеб. пособие. Воронеж: Издательско-полиграфический центр ВГУ, 2008. 44 с.

⁹ Гаврилова Н.Н., Назаров В.В. Анализ пористой структуры на основе адсорбционных данных: учеб. пособие. М.: РХТУ, 2015. 132 с.

¹⁰ Там же.

¹¹ Там же.



Таблица 3. Величины характеристик различных проб песка
Table 3. Values of various sand sample characteristics

Характеристика	Проба 1	Проба 2	Проба 3	Проба 4
Средняя минимальная объемная масса, г/см ³	1,3	1,253	1,296	1,285
Средняя максимальная объемная масса, г/см ³	1,563	1,491	1,535	1,526
Пористость, %	50,192	50,14	50,474	50,077
Удельная площадь поверхности, м ² /г	1,003	0,99	1,017	0,956

Из табл. 3 видна закономерность изменения объемной массы песков:

для δ_{min} : $1 \sim 3 > 4 > 2$;

для δ_{max} : $1 > 3 > 4 > 2$.

Как при рыхлом, так и при плотном сложении наиболее дисперсные пески проб 1 и 3 имеют максимальную объемную массу.

При исследовании массообменных процессов имеет значение масса и высота слоя сорбента. В то же время разнообразие гранулометрических характеристик песка, в частности различный дисперсный состав песков и их насыпная плотность, допускает варьирование условий опытов.

Для определения удельной поверхности песков $S_{уд}$ были использованы фракции, имеющие самый большой выход, что было установлено с помощью результатов ситового анализа (см. табл. 2). Эксперименты по определению показателя $S_{уд}$ осуществляли в статическом режиме. В колбу емкостью 200 мл помещали навеску песка массой 3 г. Затем в нее наливали 50 мл раствора метиленового голубого. Исходная концентрация раствора составляла $2 \cdot 10^{-5}$ моль/дм³. Серии предварительных экспериментов по адсорбции метиленового голубого песками позволили определить, что для всех случаев при 298 К равновесие достигается примерно через 80–90 мин. Эти же эксперименты позволили установить предельную величину адсорбции и определить сорбционную емкость песка, что дало возможность рассчитать величину удельной поверхности¹².

Удельная поверхность для дисперсных гетерогенных систем с размером частиц 10^{-5} – 10^{-3} м обычно составляет 1–2 м²/г и увеличивается со снижением размера частиц¹³, с чем

хорошо согласуются полученные результаты.

Величины средней пористости всех проб близки.

В работе не изучалось строение отдельных зерен и не оценивалась морфология их поверхности. Зерна прибрежных песков с территории Вьетнама, вероятно, имеют много выступов, впадин и других дефектов структуры (шероховатости, трещины, поры, выщерблены, сколы), поэтому они характеризуются значительной пористостью, что приводит к большой удельной поверхности.

Заключение

1. Изучаемые пески состоят в основном из α -кварца SiO_2 и α -корунда Al_2O_3 . Об этом свидетельствуют результаты рентгенофазового анализа. Минералогические составы исследуемых проб песков схожи. Доля α -кварца значительно больше, чем α -корунда.

2. Анализ гранулометрического состава показал, что наиболее дисперсными являются пробы песка 1 и 3, наиболее крупнозернистой – проба 4.

3. Рассчитанные величины среднего размера зерна хорошо согласуются с экспериментальными данными ситового анализа.

4. Установлено, что величины средней минимальной и максимальной объемной массы имеют самое большое значение для случая наиболее дисперсных песков (пробы 1 и 3).

5. Наблюдается определенная корреляция гранулометрического состава с величиной пористости и удельной поверхности, однако значения этих характеристик достаточно близки, что, возможно, объясняется особенностями морфологии поверхности зерен, которая в данной работе не изучалась.

¹² Вячеславов, А.С., Ефремова М. Определение площади поверхности и пористости материалов методом сорбции газов: методическая разработка. М.: МГУ, 2011. 65 с.

¹³ Яковлева А.А. Коллоидная химия: учеб. пособие. М.: Юрайт, 2023. 209 с.



Список источников

1. Chen Y. Construction: limit China's sand mining // *Nature*. 2017. Vol. 550. P. 457. <https://doi.org/10.1038/550457c>.
2. Шмаль А.Г. Основы общей экологии: монография. Бронницы: МУП «БНТВ», 2012. 341 с.
3. Мамедов Н.М. Новые грани экологического познания // *Философские науки*. 2011. № 6. С. 89–102. EDN: NVVKXL.
4. Белова Т.П., Латкин А.С. Разработка сорбентов для решения экологических проблем Камчатки: Монография. Петропавловск-Камчатский: КамчатГТУ, 2006. 116 с.
5. Никашина В.А. Проницаемые геохимические барьеры как способ защиты окружающей среды от загрязнений. Природные сорбенты для решения экологических задач. Математическое моделирование и расчет процессов. Обзор // *Сорбционные и хроматографические процессы*. 2019. Т. 19. № 3. С. 289–304. <https://doi.org/10.17308/sorpchrom.2019.19/746>. EDN: OXEVRP.
6. Нгуен Ч.Т., Яковлева А.А. Пески Вьетнама как объект коллоидно-химических исследований // *Проблемы земной цивилизации: материалы I Всерос. науч.-техн. конф. к 90-летию Н.М. Пожитного*. Иркутск: ИРНИТУ, 2018. С. 22–27.
7. Алампиева Е.В. Производственная деятельность человека и ее возможные последствия // *Вестник Томского государственного университета*. 2013. № 377. С. 163–166. EDN: ROVQFB.
8. Рахманин Ю.А. Актуализация методологических проблем регламентирования химического загрязнения окружающей среды // *Гигиена и санитария*. 2016. Т. 95. № 8. С. 701–707. <https://doi.org/10.18821/0016-9900-2016-95-8-701-707>. EDN: WKXHUR.
9. Buymova S.A., Bubnov A.G., Tsarev Yu.V., Semenov A.O. Assessment of potential risk and damage to population health from water and food chemical contamination // *Известия вузов. Серия Химия и химическая технология*. 2019. Т. 62. № 6. С. 119–130. <https://doi.org/10.6060/ivkkt.20196206.5816>. EDN: SRCRGS.
10. Яковлева А.А., Гусева Е.А., Константинова М.В. Исследование свойств песков Прибайкалья // *Науки о Земле и недропользование*. 2023. Т. 46. № 1. С. 51–60. <https://doi.org/10.21285/2686-9993-2023-46-1-51-60>. EDN: GITYAW.
11. Гусева Е.А., Константинова М.В. Гранулометрический состав песка проб с юго-западного побережья Байкала // *Молодежный вестник ИрГТУ*. 2019. Т. 9. № 2. С. 7–10. EDN: DKNHAJ.
12. Bayram H.N., Uslu A.N., Erdem Bakkalbasi A., Kiran Yildirim D., Döner Z., Ünlüer A.T. Geochemical and mineralogical characteristics of beach sand sediments in Southwestern Black Sea: an approach to heavy mineral placers // *EGU General Assembly Conference Abstracts*. 2020. P. 9452.
13. Yun T.S., Santamarina J.C., Ruppel C. Mechanical properties of sand, silt, and clay containing tetrahydrofuran hydrate // *Journal of Geophysical Research Atmospheres*. 2007. Vol. 112. Iss. B4. <https://doi.org/10.1029/2006JB004484>.
14. Kunhirunbowon S. A study on the properties of sand at Thap Yai Chiang mountain area for green sand casing // *Rajabhat Journal of Sciences, Humanities & Social Sciences*. 2017. Vol. 18. Iss. 2. P. 360–366.
15. Растровая электронная микроскопия для нанотехнологий. Методы и применение / ред. У. Жу, Ж.Л. Уанга, Т.П. Каминская; пер. с англ. М.: Лаборатория знаний, 2021. 601 с.
16. Кузьмина Е.В., Дмитриева Л.Р., Карасева Е.В., Колосницын В.С. О возможности применения метода сорбции красителей для определения удельной поверхности углеродных материалов для литий-серных аккумуляторов // *Известия Уфимского научного центра РАН*. 2020. № 2. С. 29–34. <https://doi.org/10.31040/2222-8349-2020-0-2-29-34>. EDN: ELSDSM.
17. Яковлева А.А., Нгуен Ч.Т. Расчет среднего размера частиц и коэффициента однородности прибрежных песков, основанный на результатах ситового анализа // *Молодежный вестник ИрГТУ*. 2020. Т. 10. № 4. С. 69–75. EDN: UNFUKG.

References

1. Chen Y. Construction: limit China's sand mining. *Nature*. 2017;550:457. <https://doi.org/10.1038/550457c>.
2. Shmal' A.G. *Fundamentals of general ecology*. Bronnitsy: Municipal Unitary Enterprise "Bronnitsy news – Television"; 2012, 341 p. (In Russ.).
3. Mamedov N. New aspects of ecological cognition. *Filosofskie nauki = Russian Journal of Philosophical Sciences*. 2011;6:89-102. (In Russ.). EDN: NVVKXL.
4. Belova T.P., Latkin A.S. *Sorbent development for solving Kamchatka environmental problems*. Petropavlovsk-Kamchatsky: Kamchatka State Technical University; 2006, 116 p. (In Russ.).
5. Nikashina V.A. Permeable reactive barriers as a way to protect the environment from pollutions. natural sorbents for solving environmental problems. Mathematical modeling and calculation of processes. Review. *Sorbtsionnye i khromatograficheskie protsessy*. 2019;19(3):289-304. (In Russ.). <https://doi.org/10.17308/sorpchrom.2019.19/746>. EDN: OXEVRP.
6. Nguen Ch.T., Yakovleva A.A. Vietnam's sands as an object of colloidal chemical research. In: *Problemy zemnoi tsivilizatsii: materialy I Vseros. naych.-tekhn. konf. k 90-letiyu N.M. Pozhitnogo = Problems of Earth Civilization: materials of the 1st All-Russian scientific and technical conference to the 90th anniversary of N.M. Pozhitny*. Irkutsk: Irkutsk National Research Technical University; 2018, p. 22-27. (In Russ.).



7. Alampieva E.V. Production activity of the person and its possible consequences. *Vestnik Tomskogo gosudarstvennogo universiteta = Tomsk State University Journal*. 2013;377:163-166. (In Russ.). EDN: ROBQFB.
8. Rakhmanin Yu.A. Actualization of methodological problems of regulation of chemical pollutions on the environment. *Gigiena i sanitariya = Hygiene and Sanitation*. 2016;95(8):701-707. (In Russ.). <https://doi.org/10.18821/0016-9900-2016-95-8-701-707>. EDN: WKXHUR.
9. Buymova S.A., Bubnov A.G., Tsarev Yu.V., Semenov A.O. Assessment of potential risk and damage to population health from water and food chemical contamination. *Izvestiya vysshikh uchebnykh zavedenii. Seriya Khimiya i khimicheskaya tekhnologiya = ChemChemTech*. 2019;62(6):119-130. <https://doi.org/10.6060/ivkkt.20196206.5816>. EDN: SRCRGS.
10. Yakovleva A.A., Guseva E.A., Konstantinova M.V. Studying Baikal region sand properties. *Nauki o Zemle i nedropol'zovanie = Earth sciences and subsoil use*. 2023;46(1):51-60. (In Russ.). <https://doi.org/10.21285/2686-9993-2023-46-1-51-60>. EDN: GITYAW.
11. Guseva E.A., Konstantinova M.V. Particle size of sand samples from the south-western coast of Lake Baikal. *Molodezhnyi vestnik IrGTU = Young Researchers Journal of ISTU*. 2019;9(2):7-10. (In Russ.). EDN: DKNHAJ.
12. Bayram H.N., Uslu A.N., Erdem Bakkalbasi A., Kiran Yildirim D., Döner Z., Ünlüer A.T. Geochemical and mineralogical characteristics of beach sand sediments in Southwestern Black Sea: an approach to heavy mineral placers. *EGU General Assembly Conference Abstracts*. 2020: 9452.
13. Yun T.S., Santamarina J.C., Ruppel C. Mechanical properties of sand, silt, and clay containing tetrahydrofuran hydrate. *Journal of Geophysical Research Atmospheres*. 2007;112(B4). <https://doi.org/10.1029/2006JB004484>.
14. Kunhirunbowon S. A study on the properties of sand at Thap Yai Chiang mountain area for green sand casing. *Rajabhat Journal of Sciences, Humanities & Social Sciences*. 2017;18(2):360-366. (In Thai).
15. Zhou W., Wang Z.L. Scanning microscopy for nanotechnology: techniques and applications; 2007, 522 p. (Russ. ed.: *Rastrovaya elektronnyaya mikroskopiya dlya nanotekhnologii. Metody i primeneniye*. Moscow: Laboratoriya znaniy; 2021. 601 p.).
16. Kuzmina E.V., Dmitrieva L.R., Karaseva E.V., Kolosnitsyn V.S. On the possibility of application of the method of sorption of dyes for determining the specific surface area of carbon materials for lithium-sulfur batteries. *Izvestiya Ufimskogo nauchnogo tsentra RAN = Proceedings of the RAS UFA scientific centre*. 2020;2:29-34. (In Russ.). <https://doi.org/10.31040/2222-8349-2020-0-2-29-34>. EDN: ELSDSM.
17. Yakovleva A.A., Nguyen Ch.T. Calculation of average particle size and uniformity coefficient of coastal sands based on sieve analysis results. *Molodezhnyi vestnik IrGTU = Young Researchers Journal of ISTU*. 2020;10(4):69-75. (In Russ.). EDN: UNFUKG.

Информация об авторах / Information about the authors



Яковлева Ариадна Алексеевна,
доктор технических наук, профессор,
профессор кафедры химии и биотехнологии им. В.В. Тутуриной,
Институт высоких технологий,
Иркутский национальный исследовательский технический университет,
г. Иркутск, Россия,
ayakovistu@mail.ru
<https://orcid.org/0000-0002-5747-2864>
Ariadna A. Yakovleva,
Dr. Sci. (Eng.), Professor,
Professor of the Department of Chemistry and Biotechnology named after V.V. Tuturina,
School of High Technologies,
Irkutsk National Research Technical University,
Irkutsk, Russia,
ayakovistu@mail.ru
<https://orcid.org/0000-0002-5747-2864>



Константинова Марина Витальевна,
кандидат химических наук, доцент,
доцент кафедры материаловедения, сварочных и аддитивных технологий,
Институт авиационного строительства и транспорта,
Иркутский национальный исследовательский технический университет,
г. Иркутск, Россия,
✉ mavikonst@mail.ru
<https://orcid.org/0000-0002-8533-0214>

**Marina V. Konstantinova,**

Cand. Sci. (Chem.), Associate Professor,
Associate Professor of the Department of Materials Science,
Welding and Additive Technologies,
Institute of Aircraft Construction, Mechanical Engineering and Transport,
Irkutsk National Research Technical University,
Irkutsk, Russia,
✉ mavikonst@mail.ru
<https://orcid.org/0000-0002-8533-0214>

**Гусева Елена Александровна,**

кандидат технических наук, доцент,
доцент кафедры материаловедения, сварочных и аддитивных технологий,
Институт авиамашиностроения и транспорта,
Иркутский национальный исследовательский технический университет,
г. Иркутск, Россия,
el.guseva@rambler.ru
<https://orcid.org/0000-0002-8719-7728>

Elena A. Guseva,

Cand. Sci. (Eng.), Associate Professor,
Associate Professor of the Department of Materials Science,
Welding and Additive Technologies,
Institute of Aircraft Construction, Mechanical Engineering and Transport,
Irkutsk National Research Technical University,
Irkutsk, Russia,
el.guseva@rambler.ru
<https://orcid.org/0000-0002-8719-7728>

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 15.08.2023; одобрена после рецензирования 05.09.2023; принята к публикации 21.09.2023.

The article was submitted 15.08.2023; approved after reviewing 05.09.2023; accepted for publication 21.09.2023.



ГОРНОПРОМЫШЛЕННАЯ И НЕФТЕГАЗОПРОМЫСЛОВАЯ ГЕОЛОГИЯ, ГЕОФИЗИКА, МАРКШЕЙДЕРСКОЕ ДЕЛО И ГЕОМЕТРИЯ НЕДР

Краткое сообщение

УДК 551.351

EDN: JWNZJH

DOI: 10.21285/2686-9993-2023-46-3-315-320



Методика опытно-фильтрационных исследований (выпусков) из высоконапорных межсолевых продуктивных залежей промышленных литиеносных рассолов галогенно-карбонатной гидрогеологической формации Сибирской платформы

Ю.К. Ланкин^а, А.Г. Вахромеев^{бв}

^аТерриториальный центр государственного мониторинга состояния недр по Иркутской области
Сибирского регионального центра государственного мониторинга состояния недр –
филиала ФГБУ «Гидроспецгеология», г. Иркутск, Россия

^аКрасноярский филиал ФГБУ «Государственная комиссия по запасам полезных ископаемых»
в г. Иркутске, г. Иркутск, Россия

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

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

^бИркутский филиал ООО «РН-Бурение», г. Иркутск, Россия

Резюме. По сути все наши знания о промышленных рассолах Сибирской платформы получены попутно при бурении скважин на нефть и газ. Целевые же исследования рассолоносных горизонтов в глубоких скважинах на углеводороды по существу не проводятся. Одной из причин этого является высокая суточная ставка в цикле бурения, и, как следствие, жесткое ограничение в проведении дополнительных работ, не связанных с бурением. Между тем от данных гидродинамических исследований прямо зависят геологические результаты: прогноз, оценка расчетных параметров продуктивных интервалов разреза, методология разведки и последующего освоения залежей и месторождений промышленных металлоносных рассолов с аномально высоким пластовым давлением. Сегодня перед крупными компаниями-недропользователями юга Иркутской области поставлена цель определиться с методикой кратковременных опытных выпусков, обеспечивающей корректные исходные данные к подсчету запасов промышленных рассолов природных межсолевых карбонатных трещинных резервуаров галогенно-карбонатной гидрогеологической формации. Для достоверного определения коэффициента водопроводимости в процессе опытно-фильтрационных работ необходимо добиться квазистационарного режима фильтрации. Оптимальным является прерывистый режим выпуска рассола с постоянным дебитом в одинаковые промежутки времени с постоянной записью изменения давления системой телеметрии. Авторами рассмотрены результаты опытных выпусков, реализованные на Знаменском участке Ангара-Ленского месторождения промышленных литиеносных рассолов. Предложена методика выпусков, которая позволяет выполнить опытно-фильтрационные работы в сжатые сроки и применима в условиях строительства скважин для добычи углеводородов. Исследования по предлагаемой методике могут проводиться недропользователями в случае неожиданного вскрытия забоем скважины рапопроявляющего пласта с аномально высоким пластовым давлением флюидной системы. Реализация опытно-фильтрационных работ по методике позволяет обосновать ресурсную базу промышленных рассолов, а также лития, рубидия, цезия, брома, йода и других редких, рассеянных элементов и минеральных солей в них.

Ключевые слова: гидроминеральное сырье, литий, опытно-фильтрационные работы, запасы промышленных вод

Для цитирования: Ланкин Ю.К., Вахромеев А.Г. Методика опытно-фильтрационных исследований (выпусков) из высоконапорных межсолевых продуктивных залежей промышленных литиеносных рассолов галогенно-карбонатной гидрогеологической формации Сибирской платформы // Науки о Земле и недропользование. 2023. Т. 46. № 3. С. 315–320. <https://doi.org/10.21285/2686-9993-2023-46-3-315-320>. EDN: JWNZJH.

APPLIED MINING AND PETROLEUM FIELD GEOLOGY,
GEOPHYSICS, MINE SURVEYING AND SUBSOIL GEOMETRY

Brief report

**Methodology of experimental filtration studies (releases)
from high-pressure inter-salt productive deposits of industrial
lithium-bearing brines of the hydrogeological halogen-carbonate
formation of the Siberian platform**Yury K. Lankin^a, Andrey G. Vakhromeev^{b,c}

^aTerritorial Center for State Monitoring of the Subsoil State in the Irkutsk Region
of the Siberian Regional Center for State Monitoring of the Subsoil State
(branch of the Federal State Budget Institution "Special Hydrogeology"), Irkutsk, Russia

^aKrasnoyarsk branch of the Federal State Budgetary Institution "State Commission for Mineral Reserves"
in Irkutsk, Irkutsk, Russia

^bInstitute of the Earth's Crust SB RAS, Irkutsk, Russia

^bIrkutsk National Research Technical University, Irkutsk, Russia

^bLLC "RN-Drilling", Irkutsk Branch, Irkutsk, Russia

Abstract. It is known that all our knowledge about the industrial brines of the Siberian platform was obtained while drilling wells for oil and gas whereas targeted studies of brine-bearing horizons in deep wells for hydrocarbons are hardly conducted. One of the reasons is the high daily rate in the drilling cycle resulting in carrying out strictly limited additional works not related to drilling. Meanwhile, the geological results including the forecast, the estimation of the calculated parameters of the section productive intervals, the exploration and development methodology of deposits of industrial metal-bearing brines with abnormally high reservoir pressure directly depend on the data of the hydrodynamic studies. Today, large companies – subsurface users of the south of the Irkutsk region are tasked to determine the methodology of short-term pilot releases, which provides correct input data for reserve calculation of industrial brines of natural inter-salt carbonate fractured reservoirs of the hydrogeological halogen-carbonate formation. To determine a reliable permeability coefficient under the experimental filtration work, it is necessary to achieve a quasi-stationary filtration mode. The optimal mode is an intermittent one of brine release with a constant flow rate at the same time intervals with a continuous recording of pressure changes by the telemetry system. The results of pilot releases implemented at the Znamenskiy site of the Angara-Lena deposit of industrial lithium-bearing brines have been considered. The release methods enabling the performance of experimental filtration work in a short time, and applicable in well construction for hydrocarbon production have been proposed. Surface users can carry out the research using the proposed methodology in the case when the well bottom unexpectedly opens a brine formation with an abnormally high reservoir pressure of the fluid system. The implementation of experimental filtration work employing the described methods allows the subsoil users to substantiate the resource base of industrial brines and the elements in them including lithium, rubidium, cesium, bromine, iodine and other rare, trace elements and mineral salts.

Keywords: hydromineral raw materials, lithium, experimental filtration works, industrial water reserves

For citation: Lankin Yu.K., Vakhromeev A.G. Methodology of experimental filtration studies (releases) from high-pressure inter-salt productive deposits of industrial lithium-bearing brines of the hydrogeological halogen-carbonate formation of the Siberian platform. *Nauki o Zemle i nedropol'zovanie = Earth sciences and subsoil use*. 2023;46(3):315-320. (In Russ.). <https://doi.org/10.21285/2686-9993-2023-46-3-315-320>. EDN: JWNZJH.

Введение

Основным методом гидрогеологических исследований являются опытно-фильтрационные работы, включающие различные виды опытов, откачки и выпуски из скважин [1–4]. Они проводятся с целью определения основных гидрогеологических параметров, изучения граничных условий водоносных горизон-

тов в плане и разрезе, а также определения оптимальной производительности скважин, подсчета запасов подземных вод и др. Непосредственно результатом откачек / выпусков является получение основных гидрогеологических параметров, к которым относятся коэффициенты фильтрации, водопроницаемости, пьезо- и уровнепроводности, водоотдачи,



упругой водоотдачи и упругоэластичности. Основные гидрогеологические параметры отражают фильтрационные, упругие и емкостные свойства водоносных горизонтов в зависимости от запасов и ресурсов подземных вод.

Глубокие горизонты, содержащие богатые литием рассолы (промышленные подземные воды или гидроминеральное сырье) характеризуются скоплением в них упругих запасов¹. Упругие запасы [3] представляют собой объем напорных вод, высвобождающийся при вскрытии водоносного пласта бурением и снижении пластового давления в нем при откачке (либо самоизливе) за счет объемного расширения воды и уменьшения порового пространства самого пласта. В Ангара-Ленском артезианском бассейне залежи гидроминерального сырья локализованы в межсолевых каверново-трещинных [5–7] рассолоносных горизонтах галогенно-карбонатной (соленосной) толщи осадочной толщи с формированием аномально высоких [8–11] пластовых давлений (АВПД). В соответствии с пластовым давлением в водонапорной системе залежи уровень подземных вод (напор) глубоких горизонтов с АВПД устанавливается выше поверхности земли на сотни и первые тысячи метров над поверхностью земли [5, 9, 10]. Глубокие продуктивные рассолоносные горизонты с АВПД не имеют связи как с надсолевыми, так и с подсолевыми горизонтами, куда могло бы осуществляться перетекание рассолов. Они ограничены сверху и снизу водоупорами, однако их граничные условия по латерали обычно неизвестны и могут иметь площадь распространения в десятки и сотни квадратных километров [1–3, 10, 11]. Продуктивные горизонты рассолов обычно имеют небольшую мощность, вскрываются одиночными скважинами, область захвата которыми промышленных подземных вод при их добыче незначительна по сравнению с площадью их распространения [1–3, 8–10, 12]. В связи с этим на этапах поисково-оценочных работ на гидроминеральное сырье природная гидрогеологическая модель участков недр с одиночными скважинами может схематизироваться как неограниченный водоносный пласт [1–3, 12].

Граничные условия пласта по площади определяются наземными геофизическими исследованиями [5].

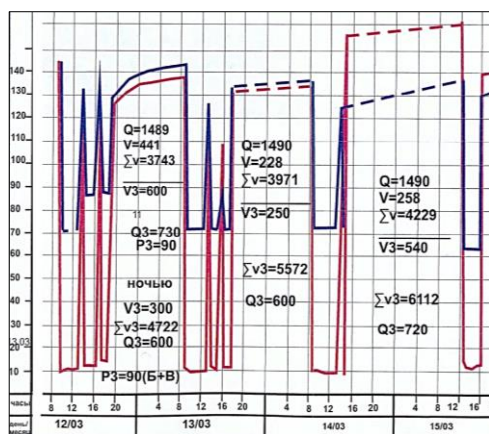
Материалы и методы исследования

Внешнее питание продуктивных горизонтов рассолов с АВПД сверху и снизу отсутствует. Это значит, что от мощности продуктивного водоносного горизонта зависят область захвата одиночными скважинами промышленных вод, объемы их ресурсов и запасов. При вскрытии высоконапорного водоносного пласта из одиночных скважин может происходить излив рассола с весьма значительным дебитом. При этом через какое-то время он может уменьшиться или прекратиться с падением напора. Так как упругие запасы характеризуются объемом воды, обеспечивающимся снижением пластового давления в нем при откачке (самоизливе), объемным расширением воды и уменьшением пустотного пространства самого пласта, опытно-фильтрационные работы необходимо выполнять на двух-трех ступенях понижения. Это связано с тем, что при значительном падении пластового давления может уменьшаться продуктивность водоносного горизонта [2]. Каждая ступень понижения будет характеризоваться своим коэффициентом водопроводимости на расчетную величину снижения пластового давления, что необходимо учитывать при гидродинамическом подсчете запасов. Перед исследованиями на режимах пишут начальную кривую восстановления давления, после режимов – конечную кривую восстановления давления, а затем отбирают глубинные пробы рассолов. Подсчет запасов также необходимо делать гидравлическим, совместным гидравлическим и гидродинамическим методами [12].

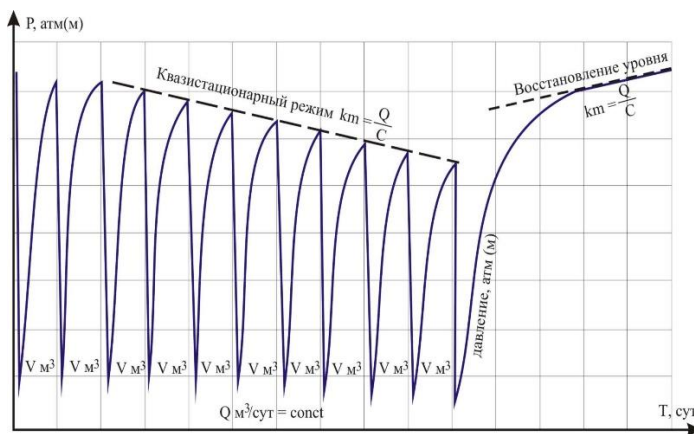
Результаты исследования и их обсуждение

Для достоверного определения коэффициента водопроводимости в процессе опытно-фильтрационных работ необходимо добиться квазистационарного режима фильтрации [1,

¹ Аузина Л.И., Ланкин Ю.К., Вахромеев А.Г. Опытные-фильтрационные исследования. Основные виды работ. Методы обработки: учеб. пособие. Иркутск: ИРНИТУ, 2016. 120 с.



a



b

Схема проведения выпуска в прерывистом режиме:

a – на скважине 3А Знаменской площади (по А.Г. Вахромееву, 2015 [5]);

b – рекомендуемая авторами

Diagram of release in the intermittent mode:

a – on the 3A Znamenskaya Square well (according to A.G. Vakhromeev, 2015 [5]);

b – recommended by the authors

3, 4, 12, 13], чего можно достигнуть лишь при постоянном дебите проводимого опыта. В скважинах с АВПД оптимальным вариантом является прерывистый режим экспресс-выпуска рассолов. Необходимо в одинаковые промежутки времени отбирать определенный объем рассолов с постоянной записью изменения давления системой телеметрии. Схема проведения опыта приведена на рисунке.

Заключение

Предложенная методика опытных выпусков требует меньшего времени исследований по сравнению с известными, позволяет добиться квазистационарного режима фильтрации и обеспечивает недропользователям корректные исходные данные к подсчету запасов промышленных металлоносных рассолов Сибирской платформы.

Список источников

1. Бондаренко С.С. Изучение и оценка ресурсов минеральных, термальных и промышленных вод. М.: Недра, 1975. 243 с.
2. Бондаренко С.С., Куликов Г.В. Подземные промышленные воды. М.: Недра, 1984. 358 с.
3. Методы поисков, разведки и оценки прогнозных ресурсов и эксплуатационных запасов промышленных вод / сост. С.С. Бондаренко, Н.В. Ефремович, Л.В. Боровский, В.П. Стрепетов. М.: Недра, 1988. 96 с.
4. Боровский Б.В. Самсонов В.Г., Язвин Л.С. Методика определения параметров водоносных горизонтов по данным откачек. М.: Недра, 1973. 304 с.
5. Вахромеев А.Г. Закономерности формирования и локализации месторождений промышленных рассолов в карбонатных каверново-трещинных резервуарах кембрия юга Сибирской платформы (по данным глубокого бурения, испытания скважин и полевой геофизики: монография). Иркутск: ИРНТУ, 2015. 247 с.
6. Голф-Рахт Т.Д. Основы нефтепромысловой геологии и разработки трещиноватых коллекторов / пер. с англ. М.: Недра, 1986. 608 с.
7. Денк С.О. Проблемы трещиноватых продуктивных объектов. Пермь: Электронные издательские системы, 2004. 334 с.
8. Алексеев С.В., Алексеева Л.П., Вахромеев А.Г., Владимиров А.Г., Волкова Н.И. Литиевые подземные воды Иркутской области и Западной Якутии // Химия в интересах устойчивого развития. 2012. Т. 20. № 1. С. 27–33. EDN: OWLSAT.
9. Алексеев С.В., Вахромеев А.Г., Коцупало Н.П., Рябцев А.Д. Промышленные рассолы Сибирской платформы: гидрогеология, бурение и добыча, переработка, утилизация: монография. Иркутск: Географ, 2014. 162 с.
10. Анциферов А.С. Ресурсы уникальных хлоридных кальциевых рассолов Сибирской платформы и проблемы их промышленного освоения // Разведка и охрана недр. 2004. № 8-9. С. 30–32.
11. Кузьмин С.Б., Вахромеев А.Г. Геоэкологические исследования на Лено-Ангарском плато. Иркутск: ИрГТУ, 2003. 122 с.



12. Методы изучения и оценка ресурсов глубоких подземных вод / ред. С.С. Бондаренко, Г.С. Вартанян. М.: Недра, 1986. 479 с.
13. Боचेвер Ф.М. Расчеты эксплуатационных запасов подземных вод. М.: Недра, 1968. 326 с.

References

1. Bondarenko S.S. *Study and assessment of mineral, thermal and industrial water resources*. Moscow: Nedra; 1975, 243 p. (In Russ.).
2. Bondarenko S.S., Kulikov G.V. *Industrial underground waters*. Moscow: Nedra; 1984, 358 p. (In Russ.).
3. Bondarenko S.S., Efremochkin N.V., Borevskii L.V., Strepetov V.P. *Prospecting, exploration and assessment methods of industrial water forecast resources and operational reserves*. Moscow: Nedra; 1988, 96 p. (In Russ.).
4. Borevskii B.V., Samsonov V.G., Yazvin L.S. *Pumping data-based methods to determine aquifer parameters*. Moscow: Nedra; 1973, 304 p. (In Russ.).
5. Vakhromeev A.G. *Patterns of industrial brine deposits formation and localization in Cambrian carbonated vuggy-fractured rocks reservoir of South Siberian Plate (from data of the deep boring drilling, test of mining holes and field geophysics)*. Irkutsk: Irkutsk National Research Technical University; 2015, 247 p. (In Russ.).
6. Van Golf-Racht T.D. *Fundamentals of fractured reservoir engineering*; 1982, 732 p. (Russ. ed.: *Osnovy neftepromyslovoi geologii i razrabotki treshchinovatykh kolektorov*. Moscow: Nedra; 1986, 608 p.).
7. Denk S.O. *Issues of fractured productive objects*. Perm: Elektronnye izdatel'skie sistemy; 2004. 334 p. (In Russ.).
8. Alekseev S.V., Alekseeva L.P., Vakhromeev A.G., Vladimirov A.G., Volkova N.I. Lithium-bearing ground waters of the Irkutsk Region and West Yakutia. *Khimiya v interesakh ustoychivogo razvitiya*. 2012;20(1):27-33. (In Russ.). EDN: OWLSAT.
9. Alekseev S.V., Vakhromeev A.G., Kotsupalo N.P., Ryabtsev A.D. *Industrial brines of the Siberian platform: hydrogeology, drilling and production, processing, disposal*. Irkutsk: Geograf; 2014, 162 p. (In Russ.).
10. Antsiferov A.S. Resources of unique calcium chloride brines of the Siberian platform and problems of their industrial development. *Razvedka i okhrana neдр = Prospect and protection of mineral resources*. 2004;8-9:30-32. (In Russ.).
11. Kuz'min S.B., Vakhromeev A.G. *Geoeological research on the Lena-Angara plateau*. Irkutsk: Irkutsk State Technical University; 2003, 122 p. (In Russ.).
12. Bondarenko S.S., Vartanyan G.S. *Research and assessment methods of deep groundwater resources*. Moscow: Nedra; 1986. 479 p. (In Russ.).
13. Bochever F.M. *Calculations of groundwater operational reserves*. Moscow: Nedra; 1968, 326 p. (In Russ.).

Информация об авторах / Information about the authors



Ланкин Юрий Константинович,

руководитель,
Территориальный центр государственного мониторинга состояния недр
по Иркутской области Сибирского регионального центра государственного
мониторинга состояния недр – филиала ФГБУ «Гидроспецгеология»,
г. Иркутск, Россия,
главный геолог,
Красноярский филиал ФГБУ «Государственная комиссия
по запасам полезных ископаемых» в г. Иркутске,
г. Иркутск, Россия,
yur-lankin@yandex.ru

Yury K. Lankin,

Head in Charge,
Territorial Center for State Monitoring of the Subsoil State in the Irkutsk Region
of the Siberian Regional Center for State Monitoring of the Subsoil State
(branch of the Federal State Budget Institution "Special Hydrogeology"),
Irkutsk, Russia,
Chief Geologist,
Krasnoyarsk branch of the Federal State Budgetary Institution
"State Commission for Mineral Reserves" in Irkutsk,
Irkutsk, Russia,
yur-lankin@yandex.ru

**Вахромеев Андрей Гелиевич,**

доктор геолого-минералогических наук, профессор,
ведущий научный сотрудник,
заведующий лабораторией геологии нефти и газа,
Институт земной коры СО РАН,
г. Иркутск, Россия,
профессор кафедры нефтегазового дела,
Институт недропользования,
Иркутский национальный исследовательский технический университет,
г. Иркутск, Россия,
главный специалист геологического отдела,
Иркутский филиал ООО «РН-Бурение»,
г. Иркутск, Россия,

✉ andrey_igp@mail.ru

<https://orcid.org/0000-0002-0712-6568>**Andrey G. Vakhromeev,**

Dr. Sci. (Geol. & Mineral.), Professor
Leading Researcher,
Head of the Oil and Gas Laboratory,
Institute of the Earth's Crust SB RAS,
Irkutsk, Russia,
Professor of the Department of Oil and Gas Engineering,
Institute of Subsoil Use,
Irkutsk National Research Technical University,
Irkutsk, Russia,
Chief Specialist of the Geology Department,
LLC "RN-Drilling", Irkutsk Branch,
Irkutsk, Russia,

✉ andrey_igp@mail.ru

<https://orcid.org/0000-0002-0712-6568>**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 17.08.2023; одобрена после рецензирования 05.09.2023; принята к публикации 14.09.2023.

The article was submitted 17.08.2023; approved after reviewing 05.09.2023; accepted for publication 14.09.2023.



К ЮБИЛЕЙНЫМ ДАТАМ

УДК 378.016:811.161.1:378.147(510)

EDN: UZCNMN

DOI: 10.21285/2686-9993-2023-46-3-321-331



О некоторых исторических аспектах в образовательной и научной сферах России и Монголии

Л.А. Рапацкая^а

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

Резюме. В статье рассмотрены исторические аспекты зарождения и развития дружественных связей российско-монгольского сотрудничества в сферах высшего образования и науки на примере Иркутского национального исследовательского технического университета (ранее Иркутский политехнический институт, Иркутский государственный технический университет, г. Иркутск, Россия) и Монгольского университета науки и технологии (ранее Монгольский государственный университет, Монгольский политехнический институт, г. Улан-Батор, Монголия). Автором проанализированы основы научных интересов педагогических коллективов указанных вузов Восточной Сибири и Монголии, которые территориально являются ближайшими соседями. На базе архивных материалов и опубликованных работ дана подробная характеристика процессов подготовки научных и педагогических кадров для Монголии в иркутском вузе с 1960 по 2022 год, освещена тематическая направленность и описан характер полевых и научно-исследовательских работ, проанализированы результаты деятельности Керуленской международной геологической экспедиции, явившейся закономерным продолжением многолетних дружественных связей России и Монголии в области образования и науки. Проведенная работа является яркой иллюстрацией конкретных достижений в областях геолого-съемочной, научно-исследовательской и педагогической деятельности коллективов высших учебных заведений двух указанных стран.

Ключевые слова: Россия, Монголия, высшее образование, наука, политехнический институт, монгольские студенты, конференции, монографии, геология, оруденение, полезные ископаемые

Для цитирования: Рапацкая Л.А. О некоторых исторических аспектах в образовательной и научной сферах России и Монголии // Науки о Земле и недропользование. 2023. Т. 46. № 3. С. 321–331. <https://doi.org/10.21285/2686-9993-2023-46-3-321-331>. EDN: UZCNMN.

ANNIVERSARIES

Some historical aspects of education and research in Russia and Mongolia

Larisa A. Rapatskaya^а

^аIrkutsk National Research Technical University, Irkutsk, Russia

Abstract. The article describes the history of the origin and development of friendly relation in Russian-Mongolian cooperation in the fields of higher education and science on the example of Irkutsk National Research Technical University (former Irkutsk Polytechnic Institute, Irkutsk State Technical University) Irkutsk, Russia and the Mongolian University of Science and Technology (former Mongolian State University, Mongolian Polytechnic Institute) Ulaanbaatar, Mongolia. The author analyzes basic scientific interests of the teaching staff of these universities of Eastern Siberia and Mongolia, which are geographically the closest neighbors. Based on archival materials and published works, a detailed description of training scientific and pedagogical personnel for Mongolia at the Irkutsk university from 1960 to 2022 is given as well as the thematic scope and the nature of field and research work are described. Moreover, the activity results of the Kerulen International Geological Expedition, which was the result of many years of friendly relations between Russia and Mongolia in the field of education and science are presented. The conducted work clearly demonstrates an example of specific



achievements in the fields of geological surveying, research and teaching activities of the academic staff of higher educational institutions of the two countries.

Keywords: Russia, Mongolia, higher education, science, Polytechnic Institute, Mongolian students, conferences, monographs, geology, mineralization, mineral resources

For citation: Rapatskaya L.A. Some historical aspects of education and research in Russia and Mongolia. *Nauki o Zemle i nedropol'zovanie* = *Earth sciences and subsoil use*. 2023;46(3):321-331. (In Russ.). <https://doi.org/10.21285/2686-9993-2023-46-3-321-331>. EDN: UZCNMN.

Введение

Восточная Сибирь, столицей которой является Иркутск – город с богатым историческим прошлым, чьи торговые и научные интересы с XIX века были тесно связаны с Монголией, традиционно играла особую роль в отношениях Монголии и России. В области образования и науки, которые всегда служили основными каналами формирования дружественной атмосферы между этими двумя странами, территориально являющимися ближайшими соседями, данная связь стала основанием для создания многолетнего дружественного сотрудничества и ряда инициатив, особенно важной из которых можно назвать создание Керуленской межвузовской (впоследствии международной) геологической экспедиции.

В 2021 году Россия и Монголия отметили 100-летие установления дипломатических отношений. Правовые основы двусторонних отношений были заложены Соглашением между Российской Советской Федеративной Социалистической Республикой (РСФСР) и Монголией об установлении дружественных отношений, подписанным 5 ноября 1921 года. Придавая важное политическое, экономическое, геополитическое и стратегическое значение отношениям со своим ближайшим соседом и союзником, РСФСР оказывала Монголии всестороннюю помощь, стремясь сохранить ее в сфере своего идейно-политического, экономического, военного и культурного влияния. В политической сфере стороны договорились об установлении дипломатических и консульских отношений, объявили утратившими силу все неравноправные договоры и соглашения, заключенные с бывшим правительством автономной Монголии, признали единственно законными современными органами власти Правительство РСФСР и Народное Правительство Монголии [1]. Участники соглашения взаимно обязались не допускать на своей тер-

ритории образования или пребывания правительств, организаций, групп или отдельных лиц, ставящих своей целью борьбу против РСФСР или Монголии. В экономической сфере РСФСР безвозмездно передавала в собственность монгольского народа телеграфную сеть в Монголии, ранее принадлежавшую РСФСР. В трех дополнительных протоколах РСФСР отказывалась от концессий и экономических привилегий царского правительства, аннулировала дореволюционный долг Монголии по отношению к России, предоставляла Монголии ссуду на сумму 1 млн руб. Данное соглашение заложило основу взаимовыгодного и равноправного сотрудничества между РСФСР и Монголией [2].

В области образования до 90-х годов XX столетия между Союзом Советских Социалистических Республик (Советским Союзом, СССР) и Монгольской Народной Республикой (МНР) также установилось тесное сотрудничество, которое развивалось в основном в двух направлениях. Первое направление было связано с обучением граждан МНР и подготовкой высококвалифицированных кадров в учебных заведениях СССР [3, 4]. В рамках второго направления осуществлялось обеспечение предприятий МНР советскими специалистами с целью оказания квалифицированной помощи в становлении и развитии промышленности [5].

В нынешнем 2023 году с начала обучения монгольских студентов в вузах Иркутска исполнилось 95 лет. 14 июня ректор Иркутского национального исследовательского технического университета (ИРНИТУ, ранее Иркутский государственный технический университет (ИрГТУ), Иркутский политехнический институт (ИПИ)) Михаил Корняков стал участником встречи, которую Совет ректоров Иркутской области организовал с представителями Монгольской ассоциации советских / российских учебных заведений.



Материалы и методы исследования

Эпоха сотрудничества ИПИ с Монголией началась в 1933 году, когда рабочий факультет Сибирского горного института провел первую учебную подготовку для пяти слушателей из Монголии. Именно с этого времени стали формироваться традиции многолетних и разносторонних контактов ИПИ с государственными организациями Монголии. Тем не менее обучение граждан Монголии в г. Иркутске началось гораздо раньше. В составе первой группы монгольских студентов, прибывших для получения образования в Иркутск, был даже будущий лидер монгольской революции и маршал МНР Хорлогийн Чойбалсан. В период 1914–1917 годов Х. Чойбалсан обучался в Высшем (Городском) начальном училище при иркутском Учительском институте, который открылся 8 октября 1909 года с разрешения Министерства народного просвещения, последовавшего в июле 1909-го. Это было среднее учебное заведение с трехгодичным курсом обучения на базе программ вначале Городского, а затем Высшего начального училища. На открытии института присутствовали губернатор, городской голова, директор народных училищ и другие лица. Молебствие совершал епископ Иоанн с ректором семинарии Евгением и духовенством. В 1913 году в Иркутск прибыла группа монгольских мальчиков. Для них в Городском училище при Учительском институте было создано монгольское отделение. Монгольские школьники усердно учились и успешно овладевали русским языком. На монгольском отделении преподавались следующие предметы: русский язык, арифметика, практическая геометрия, история, география, естествознание, рисование [6].

О периоде пребывания этой группы монгольских студентов писал иркутский историк, журналист, писатель Г.Ф. Кунгуров (рис. 1):

«Стоял голубой сентябрьский день 1913 года, тихий, ясный. Над Ангарой сияло солнце, дул колючий ветер. Улицы Иркутска были необычайно оживлены; жители с любопытством разглядывали невиданных гостей: шла группа монгольских подростков и юношей. Одеты они были в малиновые, синие и голубые широкополые “терлики” – халаты

с длинными рукавами. Поверх халатов – делембовые или шелковые пояса, на ногах – мягкие монгольские сапоги-гутули на толстой подошве с круто загнутыми вверх острыми носками. Особенно поражали любопытных черные косички мальчиков да бурханчики и амулеты, которые висели у них на груди.

Гости шли, тесно сбившись в небольшую группу, с большим вниманием рассматривали каменные дома, пестрые вывески. За группой монголов спешила довольно большая толпа городских мальчишек. Монголов сопровождал Иван Николаевич Инкижинов. Он привел их в пятую начальную школу. У входа юных гостей сердечно встретила жена Инкижинова – Александра Васильевна.

Через год к группе монголов-учащихся присоединился юноша Чойбалсан. Это была первая группа монголов-учащихся: перед ними стояла трудная, но благородная цель накопить знания, познакомиться с культурой великого русского народа» [7, с. 250].

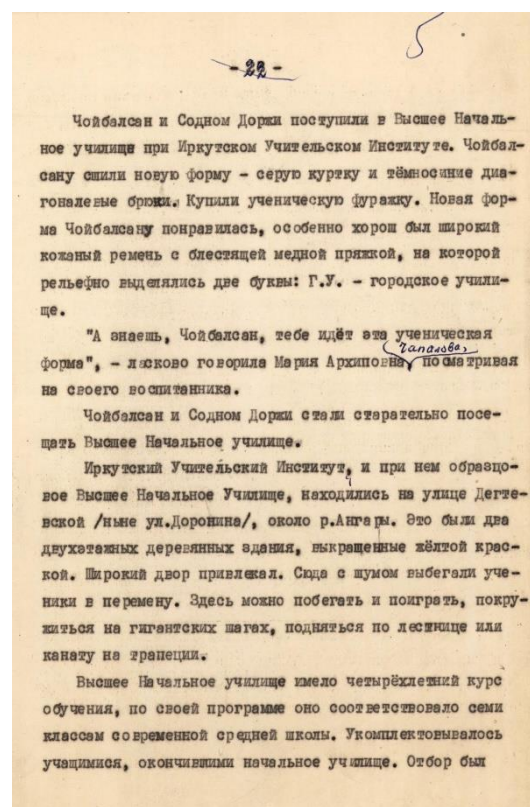


Рис. 1. Отрывок из очерка об обучении монголов в Иркутске

Фото из личного архива Г.Ф. Кунгурова

Fig. 1. An excerpt from an essay about the training of Mongols in Irkutsk

A photo from the private archive of G.F. Kungurov



Обучение монгольских студентов продолжалось в Иркутске четыре года, и это событие положило начало образованию молодежи Монголии в Восточной Сибири.

В 1952 году между СССР и МНР было заключено соглашение об обучении граждан МНР в высших учебных заведениях СССР, согласно которому советская сторона брала на себя 50 % всех затрат на обучение монгольских граждан. Процесс подготовки кадров для Монголии значительно активизировался в 1960-е годы, что было связано прежде всего с бурным развитием промышленности в Монголии и существенной нехваткой квалифицированных инженерных кадров [8].

К 1960 году обучение монгольских граждан осуществляли уже 148 высших учебных заведений в 11 городах Советского Союза. Значительное увеличение числа монгольских студентов в вузах СССР произошло в 1970-е годы. Так, если в 1960–1961 учебном году обучалось 2083 студента и аспиранта, то в конце 1970-х годов это количество составило более 3000. В совокупности в нашей стране было подготовлено более половины инженерно-технических кадров, значительное число экономистов и специалистов в различных сферах производства [9, 10].

Системная подготовка профильных специалистов началась в 1961 году в связи с увеличением потока монгольских студентов, обучающихся в СССР. В этот период в Монголии был принят план ускоренного развития промышленности. Для его осуществления требовалось большое количество специалистов инженерно-технического профиля.

Как уже отмечалось ранее, основы сотрудничества в области образования ИПИ (ИрГТУ, ИРНТУ) с Монголией были заложены в 1933 году. Тогда на рабочем факультете Сибирского горного института проходили учебную подготовку пять слушателей из Монголии. Это время по праву можно назвать началом формирования дружественных связей нашего иркутского вуза с государственными организациями соседней страны [3].

Для обучения монгольских студентов в ИПИ в 1961 году была организована секция, а с 1963 года – кафедра русского языка основных факультетов. Также был создан деканат

и введена должность декана по работе с иностранными студентами (деканы И.М. Куликов, В.И. Снетков). У истоков подготовки специалистов для Монголии в ИПИ стояли ректор А.А. Игошин, много лет возглавлявший Иркутское областное отделение Общества советско-монгольской дружбы, проректоры А.И. Промптов, М.Ф. Клееров, Ю.А. Шелковников, В.М. Степанов, декан И.М. Куликов. Адаптации монгольских учащихся к новым условиям способствовали лектории, клубы интернациональной дружбы и русского языка, встречи с писателями, поэтами, многочисленные экскурсии.

За первые 10 лет было подготовлено 260 инженеров по 25 специальностям, которые работали на горнодобывающих и обрабатывающих предприятиях, механических и машиностроительных заводах, в геологических экспедициях, проектных институтах и учебных заведениях Монголии [11].

В 1972 году в ИПИ обучалось уже 130 монгольских студентов, проходили стажировку преподаватели Монгольского политехнического института (МонПИ, изначально (до 1969 года) – часть Монгольского государственного университета (МонГУ), ныне (с 2001 года) – Монгольский университет науки и технологии (МонГУНТ)) и техникумов. При этом рабочие планы-программы стажировок специалистов были составлены на основе программ, утвержденных Министерством народного образования МНР. В подготовке инженерных кадров принимала участие большая группа опытных педагогов общенаучных, общинженерных выпускающих кафедр, кафедр общественных наук и русского языка. Плодотворную учебно-воспитательную работу с монгольскими студентами проводили профессора М.К. Косыгин, С.А. Вахромеев, И.В. Францкий, А.А. Игошин, И.А. Леоненко, доценты Е.Д. Иньшин, А.В. Сидоров, М.Ф. Клееров, Г.И. Черкасов, А.И. Промптов, О.М. Налётов, старшие преподаватели Н.Ф. Щелкунова, Е.Н. Трусова, Е.А. Елонова, Ф.Р. Коняев, преподаватели русского языка Р.В. Коновалова, И.С. Потапова, Л.Н. Храмова, Л.А. Болотова, В.Л. Богатырёва.

По устным сведениям, предоставленным Ю.А. Черновым (в 1979–1985 годах – декан



подготовительного факультета ИПИ), в состав подготовительного факультета входили три кафедры: русского языка, общественных и естественных дисциплин. Монгольские граждане в очень короткий срок должны были научиться говорить и писать на русском языке. Большое внимание уделялось черчению и технической графике.

Подготовительный факультет ИПИ готовил монгольских студентов к поступлению в различные вузы России, но в основном по окончании они предпочитали оставаться в Иркутске и поступать в сам ИПИ. После выпуска из института многие молодые инженеры занимали ответственные посты в правительстве МНР. В числе выпускников ИПИ 1980-х годов были референты Совета Министров МНР, заместители министров; ряд выпускников отмечен правительственными наградами Монголии, некоторым присвоены почетные звания. Среди них: Д. Бат-Эрдэнэ – начальник отдела геологов МНР, кавалер ордена Полярной Звезды, почетный геолог МНР, Г. Дорж – главный геолог совместной Салхитской экспедиции, почетный геолог МНР; Барс – зам. министра геологии и горнорудной промышленности МНР, кавалер ордена Полярной Звезды; Л. Эвийхуу – главный инженер Чойренского геологуправления, кавалер ордена Трудового Красного Знамени [9, 10].

Кардинальные изменения в эти годы происходили в сфере образования и в МНР. Решением Совета Министров Монголии от 14 апреля 1960 года на географическом факультете МонГУ была создана кафедра геологии, положившая начало высшему геологическому образованию в Монголии. Это было связано с интенсификацией геологических съемочных и поисковых работ, для выполнения которых наряду с подготовкой геологов в социалистических странах было принято решение готовить кадры в своей стране. В 1960 году в МонГУ также началась подготовка специалистов для промышленности и сельскохозяйственных предприятий. В 1969 году из преподавательского состава МонГУ был выделен МонПИ с пятью факультетами: строительства, энергетики, геологии, машиностроения и экономики. В 2001 году этот институт получил аккредитацию и стал называться МонГУНиТ.

Первые преподаватели пришли в вузы Монголии с университетской скамьи, не имея ни педагогического, ни производственного опыта, и в этом необходимую помощь им оказывали приглашенные коллеги из российских вузов. Шла интенсивная разработка учебных планов и программ, осуществлялось написание учебно-методических пособий, создание учебных лабораторий, происходил сбор коллекций минералов, горных пород, руд и палеонтологических окаменелостей, а также изготовление шлифов, аншлифов и других материалов для практических работ и лабораторных занятий. В это же время были заложены основы минералогического музея, открытого в 1969 году, образцы для которого были собраны в процессе полевых экспедиций преподавателей и студентов.

К 1970-м годам геологическое отделение МонПИ укрепило свой статус новыми преподавательскими кадрами, учебными лабораториями и кабинетами, экспозициями открытого минералогического музея. Начало 70-х годов ознаменовалось совместными исследовательскими работами, проводимыми прежде всего с Иркутским государственным университетом (ИГУ) на основе договора о сотрудничестве, подписанного ректорами Д. Цэвэгмидом и Н.Ф. Лосевым в 1973 году. В совместных работах принимали участие доценты В.А. Наумов, В.И. Сизых, В.В. Демидов, позже А.А. Белоголов.

Научно-исследовательскую деятельность на геологическом факультете МонПИ вел целый ряд преподавателей ИПИ: профессора Г.С. Вахрамеев, Ж.В. Семинский, В.М. Степанов читали там курсы лекций по проблемам региональной геологии, структурной геологии, металлогении, геофизическим методам исследований, геологии месторождений полезных ископаемых, геологическому картированию и геохимии. В течение 1977–1979 годов там же вели преподавание по различным геологическим дисциплинам доценты А.Н. Иванов и Л.А. Рапацкая. Сотрудники МонПИ О. Гэрэл, В. Балжинням, П. Дугараа, Ш. Батжаргал, в свою очередь, преподавали в ИрГТУ.

Активную помощь в организации и подготовке выполнения научно-исследовательских работ монгольским коллегам оказывала ка-



федра горного дела ИПИ. Для чтения лекций по вопросам современного состояния технологии подземной и открытой разработки месторождений полезных ископаемых, исследования физико-химических свойств горных пород и математической статистики в Монголию выезжали преподаватели горного факультета Л.М. Радченко, В.А. Перетолчин, В.Г. Малов, А.И. Ляхов, В.Т. Сорокин, Н.Н. Страбыкин, Ю.М. Коледин. Они принимали участие в составлении учебных пособий по курсовому и дипломному проектированию, оказывали зарубежным коллегам научно-методическую помощь в подготовке кандидатских диссертаций.

Начиная с 1975 года горный факультет ИПИ совместно с МонПИ приступил к выполнению программы исследований по совершенствованию технологии горных работ и улучшению условий труда на горных предприятиях Монголии. С учетом этого были выполнены научно-исследовательские работы по изучению физико-механических свойств горных пород Шарынгольского карьера: проведен анализ работы буровых станков; осуществлен выбор рациональных параметров бурового инструмента; разработаны и внедрены новые конструкции буровых долот; проведен анализ работы выемочного горнотранспортного оборудования; рекомендованы рациональные параметры буровзрывных работ.

С 1977 года действует договор о межвузовском сотрудничестве ИПИ с МонПИ, продленный в 1988 году. На основе договора о дружбе и сотрудничестве на базе МонПИ создан научно-образовательный российско-монгольский центр с представительствами в Иркутске и Улан-Баторе. В задачи центра входит подготовка монгольской молодежи к обучению в российских вузах, а также совместное обучение российских и монгольских студентов [11]. Для более успешного сотрудничества двух дружественных стран на восточном факультете в 1997 году начато преподавание монгольского языка для российских студентов.

В мае 1995 года между ИрГТУ, МонПИ и монгольской акционерной компанией «Шарынгол» был заключен договор о проведении совместных научно-исследовательских работ по теме «Испытание и исследование работы режущего бурового инструмента в условиях

разреза «Шарынгол»». Коллективом ученых разработан новый буровой инструмент для взрывных скважин (получены патенты Монголии).

Большим событием 1998 года стало участие ИрГТУ в официальных мероприятиях форума монгольских выпускников иркутских вузов в Улан-Баторе. Организованная по инициативе общества дружбы «Россия – Монголия» встреча выпускников переросла в большой праздник дружбы – Дни Иркутска в Улан-Баторе. Приуроченная к этому событию выставка музея истории университета о подготовке кадров для Монголии получила всеобщее признание и по просьбе российского посольства была оставлена в Улан-Баторе для постоянного экспонирования [9, 10, 12, 13].

В развитии геологического образования и научных исследований в международных коллективах России и Монголии, а также Китая большую роль сыграла Керуленская межвузовская геологическая экспедиция, заложившая в далекие 1970-е годы краеугольный камень в трехстороннем тесном сотрудничестве в областях образования и науки и послужившая успешным инновационным долгосрочным проектом. Положение об экспедиции было утверждено на уровне правительств России и Монголии. С 1991 года к проекту присоединился Хэбэйский геологический институт (позже переименованный в Шицзячжуанский университет экономики) Китайской Народной Республики (КНР) и экспедиция получила статус международной. Кроме того, в работе экспедиции принимали участие ученые Сибирского отделения Российской академии наук, геологи из Словакии и Германии (рис. 2).

Одной из основных задач Керуленской геологической экспедиции стала подготовка кадров высшей квалификации для Монголии и России. Позднее, как уже было отмечено выше, к работе экспедиции присоединились ученые Сибирского отделения Российской академии наук, горного факультета ИрГТУ и Высшей технической школы г. Кошица (Словакия), а также геологи из Фрайбергской горной академии (Германия). Тематика научных исследований значительно расширилась и стала включать четыре основных направления, в том числе по международной программе «Керуленская экспедиция» и проекту геологи-



Рис. 2. Исполнительный комитет Керуленской международной геологической экспедиции (слева направо): П. Дугараа, С. Новосёлов, Ж. Семинский, О. Гэрэл, П. Коваль, Г. Чулуун
Fig. 2. Executive Committee of the Kerulen International Geological Expedition (from left to right): P. Dugaraa, S. Novoselov, Zh. Seminsky, O. Gerel, P. Koval, G. Chuluun

ческой корреляции Сибирской и Северо-Китайской платформ, затем было определено новое направление геологических исследований – экологическое.

Судьбоносным оказалось решение о проведении геолого-съёмочных работ в излучине священной реки Керулен. Первые работы на основе договора, заключенного в 1973 году с геологической службой Монголии, начались с проведения геологической съёмки масштаба 1:200000 в среднем течении Керулена на базе договора о сотрудничестве между МонПИ и ИПИ, который был подписан ректором МонГУ Н. Содномом и ректором ИПИ А.А. Игошиным. Эти исследования позволили получить неоценимый опыт в научной и практической сферах образовательных организаций обеих стран: России и Монголии. Хэбэйский геологический институт КНР, как было указано выше, присоединился к работе Керуленской геологической экспедиции уже позднее.

Наиболее плодотворным периодом в работе Керуленской экспедиции стали 70-80-е годы прошлого века. Экспедиция финансировалась из бюджета хоздоговорных работ. Успешным был проект по проведению поис-

ково-съёмочных работ в районе Жанчивланского массива, который послужил модельным примером среди многочисленных подобных массивов Хэнтэйского батолита раннемезозойского возраста. В 1980-е годы тематика работ включала также структурные, геофизические, гидрогеологические исследования [14, 15]. Были составлены геологическая и структурная карты массива, по результатам работ написана монография [16]. По завершении съёмочных работ на Жанчивлане продолжались поисковые работы на смежных территориях. Учеными из Института земной коры СО РАН (ИЗК СО РАН) особое внимание уделялось изучению трещинной тектоники и гравитационным аномалиям. Была предложена методика изучения структур массива, дана подробная характеристика редкометалльно-гранитного магматизма [16, 17]. Подробно были изучены петрографические особенности редкометалльных гранитоидов и гидрогеологические особенности Жанчивланского рудного района [18–20].

Для монгольских преподавателей эти работы послужили основой для будущих детальных исследований под руководством россий-



ских ученых с последующей защитой кандидатских диссертаций: Я. Болд – по геоморфологии, В. Балжинням – по петрографии гранитов, Ч. Сэрээготов – по рудным минералам, Г. Ухнаа – по геохимическим поискам, Г. Чулуун – по структурам, П. Дугараа – по геофизике.

В съемочных и поисковых работах принимал участие большой коллектив преподавателей кафедры геологии и минералогии МонПИ во главе с начальником партии Д. Чулууном и научным руководителем Ж. Ган-Очиром. В полевых и камеральных работах принимали участие преподаватели ИПИ Г.С. Вахромеев, Ю.А. Чернов, А.Н. Иванов, сотрудники ИЗК СО РАН Ю.А. Комаров и С.В. Новосёлов.

В проектах оговаривались виды работ (полевые, камеральные), сроки исполнения, объемы финансирования с обеих сторон и виды отчетности (полевая документация, публикации).

В 1988 году Керуленская межвузовская геологическая экспедиция была включена в комплексную программу Совета экономической взаимопомощи до 2000 года, приказом Министерства высшего и среднего специального образования РСФСР № 326 от 27 июня 1988 года была сформирована программа «Керуленская экспедиция», к работе которой на паритетных началах были привлечены вузовские организации МНР, КНР, Германской Демократической Республики и Чехословацкой Социалистической Республики.

Программой предусматривалось изучение потенциально рудоносных геологических систем Центральной Азии в Центральной Монголии и смежных областей России и Китая. Фундаментальность проводимых исследований была подтверждена экспертизой Всесоюзного научно-исследовательского института «Зарубежгеология» и Министерства высшего и среднего специального образования РСФСР, после чего было разработано положение о Керуленской геологической экспедиции, подписаны техническое задание и план работ до 1995 года.

Результаты исследования

Основные практические, образовательные и научные результаты проведенных за прошедшие годы в рамках дружественных связей

российско-монгольского сотрудничества совместных работ сводятся к следующему:

1. Разработана классификация региональных геологических систем сложнопостроенных регионов Центральной Азии в зависимости от геодинамических условий их формирования (зрелости) активизируемого континентального субстрата.

2. Реконструирован механизм формирования сложнопостроенных межформационных гранитных массивов в структурах гранитосводового тектогенеза на основе структурно-геологических и геофизических моделей.

3. Разработаны геофизические модели гранитных массивов в системах гранитосводового тектогенеза.

4. Реконструированы геодинамические условия формирования подземных вод в гидрогеологических системах типа рифтов.

5. Открыты новые месторождения угля, золота, редких металлов, мусковитов, керамических пегматитов и кварца.

6. К проводимым в рамках Керуленской геологической экспедиции исследованиям привлекалось до 170 студентов России и Монголии. По ее материалам защищено 7 докторских и 17 кандидатских диссертаций. Материалы исследований Керуленской геологической экспедиции опубликованы примерно в 400 печатных работах и 21 монографии, 26 учебниках и учебных пособиях. Результаты исследований были представлены на международных конференциях, симпозиумах и международных геологических конгрессах. К 2021 году по итогам экспедиции проведена 21 международная научная конференция, результаты которых опубликованы в 14 научных и 7 производственных отчетах.

Заключение

В период с начала 1960-х годов по 2019 год ИПИ (ИргТУ, ИРНТУ) сыграл значительную роль в подготовке высококвалифицированных кадров для экономики, науки, образования и культуры дружественной Монголии. Данное сотрудничество развивалось в основном в двух направлениях: подготовки научных и педагогических кадров для МНР и командирования специалистов для работы на предприятиях Монголии. Правительство России и



Монголии дало высокую оценку проведенной в этой области работе, наградив большую группу специалистов Керуленской геологической экспедиции, в том числе ряд профессоров ИРНИТУ, орденами и медалями. А.Н. Иванов награжден орденом «Знак Почета». С.Б. Леонову, Г.С. Вахромееву, Ю.А. Чернову, А.Н. Иванову, Л.А. Рапацкой было присвоено высокое звание «Почетный профессор Монгольского технического университета». За высокие заслуги в развитии образования, воспитании молодого поколения орденом учительской славы «Золотая фортуна» награждены Ю.А. Чернов, Ж.В. Семинский и Л.А. Рапацкая.

Директору Минералогического музея ИрГТУ Л.Д. Вахромеевой вручен орден «Подвиг учителя». Кроме того, Ю.А. Чернов награжден медалями «Дружба», «60 лет МНР», знаками «Отличник образования МНР», «Почетный учитель МНР», «Почетный геолог МНР».

Взаимовыгодные дружественные связи иркутских и монгольских вузов продолжают и в настоящее время: в наши дни заключены долгосрочные договоры, направленные на проведение совместных научно-исследовательских работ, на реализацию научно-образовательных проектов, а также по другим направлениям сотрудничества.

Список источников

1. Орлова К.М. Россия – Монголия: век дружбы и сотрудничества (к 100-летию установления дипломатических отношений) // *Oriental Studies*. 2021. Т. 14. № 5. С. 888–899. <https://doi.org/10.22162/2619-0990-2021-57-5-888-899>. EDN: RVKFHY.
2. Мягкая сила в российско-монгольских отношениях: кол. монография / отв. ред. В.А. Родионов, А. Нямдолжин. Иркутск: Оттиск, 2022. 196 с.
3. Ганжуров В.Ц. Россия – Монголия (на трудном пути реформ). Улан-Удэ: БНЦ СО РАН, 1997. 106 с.
4. Комбаев А.В. Давыд М. Российское образование как «мягкая сила»: образовательные стратегии монгольских студентов // *Власть*. 2022. Т. 30. № 3. С. 216–220. <https://doi.org/10.31171/vlast.v30i3.9071>. EDN: EKINQS.
5. Родионов В.А. Россия и Монголия: новая модель отношений в начале XXI века. Улан-Удэ: БНЦ СО РАН, 2009. 228 с.
6. Иркутские повествования. 1661–1917 годы / авт.-сост. А.К. Чернигов. В 2 т. Иркутск: Оттиск, 2003. Т. 2. 464 с.
7. Кунгуров Г.Ф. Чойбалсан в Иркутске // *Восьмые востоковедные чтения БГУ: сб. науч. тр.* Иркутск: БГУ, 2017. С. 250–264. EDN: QMVWKK.
8. Ганжуров, В.Ц. Россия – Монголия (история, проблемы, современность). Улан-Удэ: БНЦ СО РАН, 1997. 181 с.
9. Арьянов А.Д., Жабаева Л.Б. Формирование инженерно-технических и управленческих кадров Монголии в Иркутском государственном техническом университете (1960–1990-е гг.) // *Вестник Восточно-Сибирского государственного университета технологий и управления*. 2014. № 1. С. 158–162. EDN: SDEKOZ.
10. Арьянов А.Д. Подготовка инженерно-технических кадров Монголии в Иркутском государственном техническом университете (1960–1990-е гг.) // *Военно-политическое, экономическое и культурное сотрудничество СССР и МНР в 1920–1940-е гг.: материалы Междунар. науч.-практ. конф. (г. Улан-Удэ, 10 декабря 2014 г.)*. Улан-Удэ: БГУ, 2015. С. 206–214. EDN: VARHQX.
11. Джагаева О.А. Россия и Монголия: очерк истории взаимоотношений в последней четверти XX столетия. М., 2003. 138 с.
12. У истоков ИрГТУ: краткая история развития и становления горного факультета Иркутского государственного технического университета / отв. ред. Д.Е. Махно, А.И. Ляхов. Иркутск: ИрГТУ, 2000. 31 с.
13. Тальгамер Б.Л. Иркутской школе горных инженеров – 90 лет // *Науки о Земле и недропользование*. 2021. Т. 44. № 4. С. 358–368. <https://doi.org/10.21285/2686-9993-2021-44-4-358-368>. EDN: KVVUBU.
14. Белоголовкин А.А. Методика структурного изучения рудоносных гранитов на примере Жанчивланского массива Центральной Монголии // *Вопросы геологии Восточной Монголии и сопредельных территорий: сб. статей*. Иркутск, 1980. С. 14–16.
15. Белоголовкин А.А., Чулуун Д. Трещинная тектоника Жанчивланского гранитного массива // *Вопросы геологии полезных ископаемых Центральной и Восточной Монголии: сб. статей*. Улан-Батор, 1982. С. 6–8.
16. Жанчивланский редкометалльный гранитный массив в Центральной Монголии / науч. ред. Г.С. Вахромеев, Ю.В. Комаров. Иркутск: ИПИ, 1984. 112 с.
17. Балжинням З., Иванов А.Н., Рапацкая Л.А., Наумов В.А. О наложенной калишпатизации в резкопорфировидных гранитах южной части Жанчивланского массива // *Вопросы геологии и металлогении Восточной Монголии: сб. статей*. Улан-Батор, 1979. С. 153–157.
18. Антипин В.С. Петрология и геохимия гранитоидов различных фаций глубинности. Новосибирск: Наука, 1977. 157 с.



19. Балжинням В., Гэрэл О. Петрографо-петрохимическая характеристика гранитоидов Жанчивланского района // Вопросы геологии Восточной Монголии и сопредельных территорий: сб. статей. Иркутск, 1980. С. 30–31.
20. Баяраа И. Краткая гидрогеологическая характеристика Жанчивланского рудного района // Вопросы геологии и металлогении Восточной Монголии: сб. статей. Улан-Батор, 1979. С. 173–181.

References

1. Orlova K.M. Russia – Mongolia: a century of friendship and cooperation (celebrating the 100th anniversary of diplomatic relations). *Oriental Studies*. 2021;14(5):888-899. (In Russ.). <https://doi.org/10.22162/2619-0990-2021-57-5-888-899>. EDN: RVKFHY.
2. Rodionov V.A., Nyamdolzhin A. *Soft power in Russian-Mongolian relations*. Irkutsk: Ottisk; 2022, 196 p. (In Russ.).
3. Ganzhurov V.Ts. *Russia – Mongolia: on the difficult path of reforms*. Ulan-Ude: Buryat Scientific Centre SB RAS; 1997, 106 p. (In Russ.).
4. Kombaev A.V., Davyd M. Russian education as a soft power: educational strategies of Mongolian students. *Vlast' = The Authority*. 2022;30(3):216-220. (In Russ.). <https://doi.org/10.31171/vlast.v30i3.9071>. EDN: EKIQNS.
5. Rodionov V.A. *Russia and Mongolia: a new model of relations at the beginning of the 21st century*. Ulan-Ude: Buryat Scientific Centre SB RAS; 2009, 228 p. (In Russ.).
6. Chernigov A.K. *Irkutsk stories. 1661–1917*. In 2 vol. Irkutsk: Ottisk; 2003, vol. 2, 464 p. (In Russ.).
7. Kungurov G.F. Choybalsan in Irkutsk. In: *Vos'mye vostokeydnye chteniya BGU = 8th Oriental Readings of the Baikal State University*. Irkutsk: Baikal State University; 2017, p. 250-264. (In Russ.). EDN: QMVWKK.
8. Ganzhurov, V.Ts. *Russia – Mongolia: history, problems, modern time*. Ulan-Ude: Buryat Scientific Centre SB RAS; 1997, 181 p. (In Russ.).
9. Aryanov A.D., Zhabaeva L.B. Formation of engineering, technical and administrative personnel of Mongolia at Irkutsk State Technical University (1960–1990th). *Vestnik Vostochno-Sibirskogo gosudarstvennogo universiteta tekhnologii i upravleniya = The Bulletin of ESSTUM*. 2014;1:158-162. (In Russ.). EDN: SDEKOZ.
10. Aryanov A.D. Engineer-technician personnel training of Mongolian people in Irkutsk State Technical University (1960–1990). In: *Voenno-politicheskoe, ekonomicheskoe i kul'turnoe sotrudnichestvo SSSR i MNR v 1920–1940-e gg.: materialy Mezhdunar. nauch.-prakt. konf. = Military and political, economic and cultural cooperation of the USSR and the Mongolian People's Republic in the 1920–1940s: materials of the International scientific and practical conference*. 10 December 2014, Ulan-Ude. Ulan-Ude: Baikal State University; 2015, p. 206-214. (In Russ.). EDN: VARHQX.
11. Dzhabaeva O.A. *Russia and Mongolia: an essay on the history of relations in the last quarter of the 20th century*. Moscow; 2003, 138 p. (In Russ.).
12. Makhno D.E., Lyakhov A.I. *The origins of the Irkutsk state technical university: a brief history of the development and formation of the mining faculty of Irkutsk State Technical*. Irkutsk: Irkutsk State Technical University; 2000, 31 p. (In Russ.).
13. Talgamer B.L. Irkutsk school of mining engineers is celebrating 90th anniversary. *Nauki o Zemle i nedropol'zovanie = Earth sciences and subsoil use*. 2021;44(4):358-368. (In Russ.). <https://doi.org/10.21285/2686-9993-2021-44-4-358-368>. EDN: KVVUBU.
14. Belogolovkin A.A. Structural study methods of ore-bearing granites for the case of the Zhanchlan massif of Central Mongolia. In: *Voprosy geologii Vostochnoi Mongolii i sopredel'nykh territorii = Geology issues of Eastern Mongolia and adjacent territories*. Irkutsk; 1980, p. 14-16. (In Russ.).
15. Belogolovkin A.A., Chuluun D. Fracture tectonics of Zhanchivlan granite massif. In: *Voprosy geologii poleznykh iskopaemykh Tsentral'noi i Vostochnoi Mongolii = Geology issues of Central and Eastern Mongolia*. Ulan-Bator; 1982, p. 6-8. (In Russ.).
16. Vakhromeev G.S., Komarov Yu.V. *Zhanchivlan rare-metal granite massif of Central Mongolia*. Irkutsk: Irkutsk Polytechnic Institute; 1984, 112 p. (In Russ.).
17. Balzhinnyam Z., Ivanov A.N., Rapatskaya L.A., Naumov V.A. On superimposed K-feldspathization of sharply porphyritic granites of the southern part of the Zhanchivlan massif. In: *Voprosy geologii i metallogenii Vostochnoi Mongolii = Geology and metallogeny issues of Eastern Mongolia*. Ulan-Bator; 1979, p. 153-157. (In Russ.).
18. Antipin B.C. *Petrology and geochemistry of granitoids of various depth facies*. Novosibirsk: Nauka; 1977, 157 p. (In Russ.).
19. Balzhinnyam V., Gerel O. Petrographic and petrochemical characteristics of Zhanchivlan district granitoids. In: *Voprosy geologii Vostochnoi Mongolii i sopredel'nykh territorii = Geology issues of Eastern Mongolia and adjacent territories*. Irkutsk; 1980, p. 30-31. (In Russ.).
20. Bayaraa I. Brief hydrogeological characteristics of the Zhanchivlan ore region. In: *Voprosy geologii i metallogenii Vostochnoi Mongolii = Geology and metallogeny issues of Eastern Mongolia*. Ulan-Bator; 1979, p. 173-181. (In Russ.).



Информация об авторе / Information about the author



Рапацкая Лариса Александровна,

кандидат геолого-минералогических наук, доцент,
профессор кафедры нефтегазового дела,
Институт недропользования,
Иркутский национальный исследовательский технический университет,
г. Иркутск, Россия,

✉ raplarisa@yandex.ru

Larisa A. Rapatskaya,

Cand. Sci. (Geol. & Mineral.), Associate Professor,
Professor of the Department of Oil and Gas Engineering,
Institute of Subsoil Use,
Irkutsk National Research Technical University,
Irkutsk, Russia,

✉ raplarisa@yandex.ru

Вклад автора / Contribution of the author

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

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

Конфликт интересов / Conflict of interests

Автор заявляет об отсутствии конфликта интересов.

The author declares no conflicts of interests.

Автор прочитал и одобрил окончательный вариант рукописи.

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

Информация о статье / Information about the article

Статья поступила в редакцию 18.08.2023; одобрена после рецензирования 29.08.2023; принята к публикации 19.09.2023.

The article was submitted 18.08.2023; approved after reviewing 29.08.2023; accepted for publication 19.09.2023.



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 специальностям:

- 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 геолого-разведочных работ (технические науки);
- 2.8.3. Горнопромышленная и нефтегазопромысловая геология, геофизика, маркшейдерское дело и геометрия недр (технические науки);
- 2.8.3. Горнопромышленная и нефтегазопромысловая геология, геофизика, маркшейдерское дело и геометрия недр (геолого-минералогические науки).

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

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

4. Статья сопровождается:

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

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

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

6. В журнал принимаются статьи трех типов:

Научная статья. Научная статья представляет собой оригинальную исследовательскую рукопись. Такого рода работа должна сообщать о результатах проведения научно обоснованных экспериментов и содержать значительный объем новой информации. Подготовка оригинальной статьи подразумевает использование самых свежих и актуальных источников в данной обла-



сти. Структура подобной работы включает разделы «Введение», «Материалы и методы исследования», «Результаты исследования», «Обсуждение полученных результатов» и «Заключение». Рекомендуемый минимальный объем научной статьи – 3500 слов.

Обзорная статья. Обзорная статья предполагает проведение всестороннего анализа существующей литературы в области исследования, который выявляет текущие пробелы или проблемы. Такая работа должна быть критической и конструктивной и содержать рекомендации для будущих исследований. В ней не следует представлять никаких новых неопубликованных данных. Структура обзорной статьи может включать введение, другие необходимые разделы, обсуждение полученных результатов, а также заключение с указанием будущих направлений для возможных исследований. Рекомендуемый минимальный объем обзорной статьи – 4000 слов.

Краткое сообщение. Краткое сообщение представляет собой краткую статью, посвященную новому объекту, технологии, методу. Оно также может содержать предварительные результаты исследования либо краткое изложение полного исследования. В кратком сообщении должны быть описаны важные модификации или уникальные применения описанного метода. Краткие сообщения обычно содержат два-три рисунка и/или таблицу; раздел «Материалы и методы исследования» в них должен быть детализирован, чтобы обеспечить воспроизводимость представленной работы, а обзорная часть сокращена. Структура подобной работы аналогична структуре научной статьи и включает такие разделы, как «Введение», «Материалы и методы исследования», «Результаты исследования», «Обсуждение полученных результатов» и «Заключение». Рекомендуемый минимальный объем краткого сообщения – 2500 слов. Допускается последующая публикация расширенного материала, изложенного в кратком сообщении, в нашем либо ином издании с обязательной ссылкой на первую статью.

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, заключение, библиографический список и references, критерии авторства, конфликт интересов и сведения об авторах (вся информация предоставляется одним файлом, названным следующим образом: *Фамилия первого автора – Первые три-четыре слова названия.doc*).

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

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

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

10. Формулы в тексте должны быть набраны в специальном редакторе формул Microsoft Word посредством опции «вставка» – «уравнение». Все экспликации элементов формул необходимо также выполнять в редакторе формул.



11. Таблицы должны содержать только необходимые данные и представлять собой обобщенные и статистически обработанные материалы с указанием обозначения переменных. Каждая таблица снабжается заголовком. Формат таблиц – книжный, направление шрифта – по горизонтали.

12. Графические материалы к статье (рисунки и фотографии) представляются в минимальном количестве (не более 6 единиц) и должны быть выполнены в соответствии с требованиями к геологической графике. Выбирается масштаб, пригодный для тиражирования, а размер – не более 170×245 мм. Графические материалы должны допускать перемещение в тексте и возможность изменения размеров. Каждый рисунок сопровождается надписями в содержательной части и подрисуночной подписью, в которой представляется объяснение всех его элементов. Названия рисунков и подрисуночные подписи должны быть максимально краткие, основная информация предоставляется в тексте.

Все надписи на рисунках должны быть редактируемыми и выполненными 8 кеглем шрифта Arial (основной) на языке текста статьи. В некоторых случаях размер шрифта может быть уменьшен до 5-6 pt. Буквенная нумерация рисунков выполняется 10 кеглем шрифта Arial (полужирный курсив) на английском языке. Помимо представления в тексте статьи рисунки должны быть дополнительно предоставлены отдельными файлами. Векторная графика дополнительно предоставляется в форматах CDR, AI с возможностью редактирования, при экспорте из других программ следует использовать формат PostScript (EPS) с разрешением 300 dpi. Фотографии, сканированные материалы представляются в формате TIFF или PNG / JPEG (сохранение в формате PNG / JPEG необходимо производить в максимально высоком качестве). Разрешение растровой графики должно составлять не менее 600 dpi для черно-белых рисунков и не менее 300 dpi для фотографий. Схемы, графики, диаграммы предоставляются с расширением .xls (MS Excel).

13. Ссылки на литературные источники приводятся в квадратных скобках в порядке возрастания. Библиографический список формируется по мере упоминания источников в тексте.

Рекомендуемое количество источников в библиографическом списке – не менее 20, при этом минимум 50 % списка рекомендуется занимать материалами, вышедшими в течение последних 5 лет, в том числе не менее 5 источников должны составлять статьи из иностранных журналов. Самоцитирование автора не должно превышать 25 % от общего количества источников, самоцитирование журнала рекомендуется свести до минимума.

В списке литературы допускаются ссылки на статьи из научных журналов, из сборников материалов научных конференций, из неперiodических сборников научных статей, на книги, посвященные научным исследованиям, а также авторские патенты. Редакционная коллегия рекомендует в списке литературы ссылаться на статьи из журналов, входящих в ядро РИНЦ (Russian Science Citation Index, Web of Science Core Collection, Scopus).

Не допускаются ссылки на нормативные правовые акты (законы, кодексы, указы, положения и пр.), учебные издания (учебники, учебные пособия, конспекты лекций, методические указания и т. д.), справочные издания (справочники, словари и энциклопедии), диссертации и авторефераты, геологические карты, а также страницы электронных ресурсов, не имеющие конкретного авторства. При необходимости обращения к этим источникам ссылку на них следует размещать в подстрочной сноске.

14. Список литературы составляется в двух вариантах. Первый вариант (список источников) 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. Академика Курчатова, 3, каб. 207 (институт «Сибирская школа геонаук», Иркутский национальный исследовательский технический университет).

Главный редактор Александр Вадимович Паршин, тел.: +7 (902) 7666990, e-mail: sarhin@geo.istu.edu.

Заместитель главного редактора Лариса Ивановна Аузина, тел.: +7 (3952) 405108, e-mail: lauzina@mail.ru.

Статьи следует направлять ответственному секретарю Марии Николаевне Долгих через личный кабинет на сайте www.nznj.ru или по электронной почте nzn@istu.edu; тел.: +7 (952) 6214436, адрес: 664074, Россия, г. Иркутск, ул. Лермонтова, 83, ауд. Е-219.



Образец оформления статьи

УДК 549.09

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

Е.М. Курчевская^a, М.В. Яхно^b, А.Е. Сенченко^c^{a,c}НИИПИ «Технологии обогащения минерального сырья», г. Иркутск, Россия^bИркутский национальный исследовательский технический университет, г. Иркутск, Россия

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

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

Финансирование:**Благодарности:**

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

Elena M. Kurchevskaya^a, Marina V. Yakhno^b, Arkady Y. Senchenko^c^{a,c}NIPI TOMS (Scientific Research and Design Institute "Technologies of Minerals Separation"), Irkutsk, Russia^bIrkutsk National Research Technical University, Irkutsk, Russia

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 composition. Chalcopyrite contains carbonated diorites. Chalcopyrite and pyrite are predominant elements in ore composition.



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

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

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

Портретное
фото автора
(4×4 см)

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

Портретное
фото автора
(4×4 см)

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

Портретное
фото автора
(4×4 см)

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 46 № 3 (84) 2023

Дизайнер А.А. Хохряков
Редактор Ф.А. Посысоева
Перевод на английский язык В.В. Батицкой
Компьютерная верстка Ф.А. Посысоевой

Издание распространяется бесплатно

Выход в свет 29.09.2023 г. Формат 60×90/8.
Бумага офсетная. Печать цифровая. Усл. печ. л. 9,75.
Тираж 500 экз. Зак. 109. 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