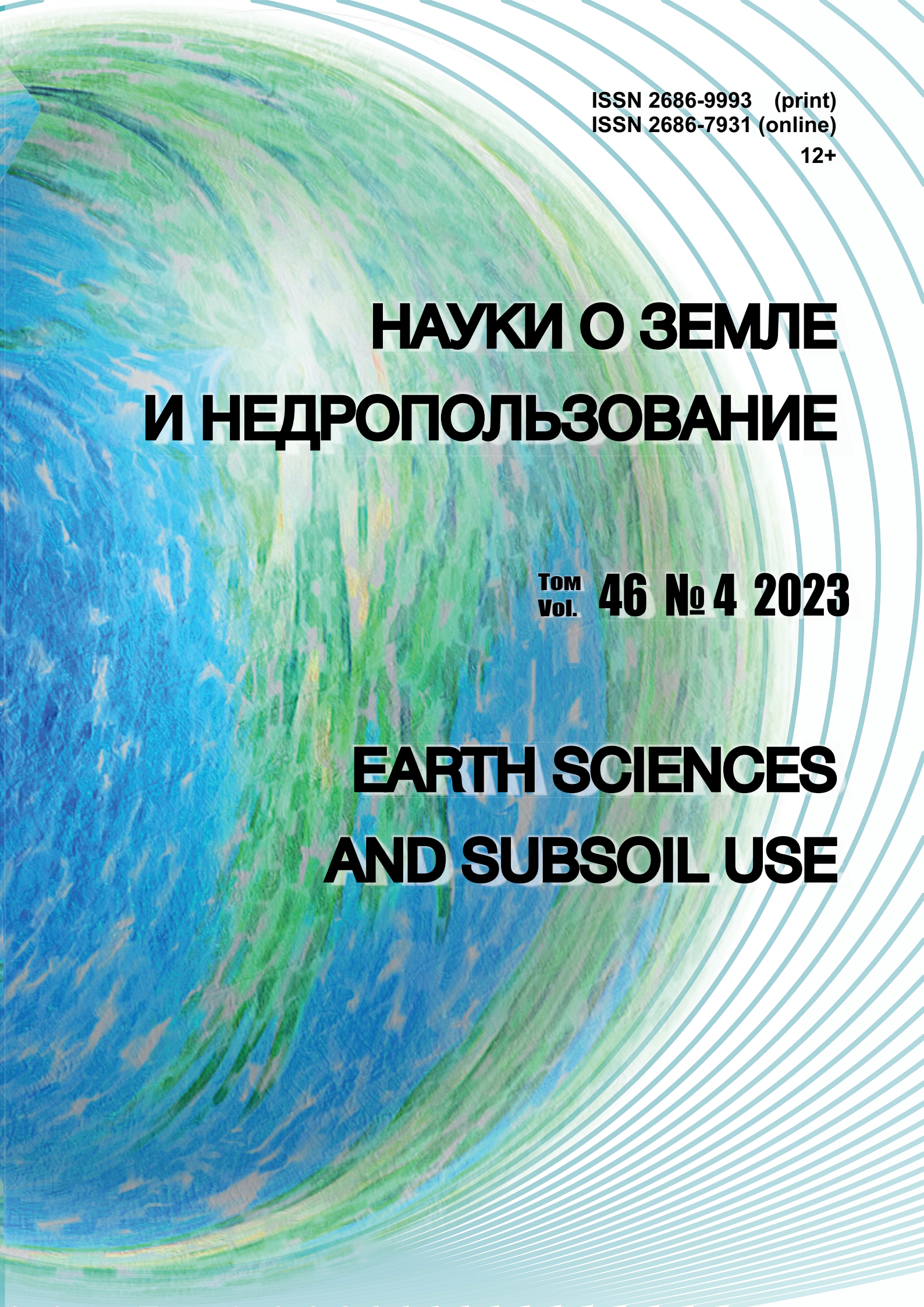




ISSN 2686-9993 (print)
ISSN 2686-7931 (online)
12+

НАУКИ О ЗЕМЛЕ И НЕДРОПОЛЬЗОВАНИЕ

Tom Vol. 46 № 4 2023

EARTH SCIENCES AND SUBSOIL USE

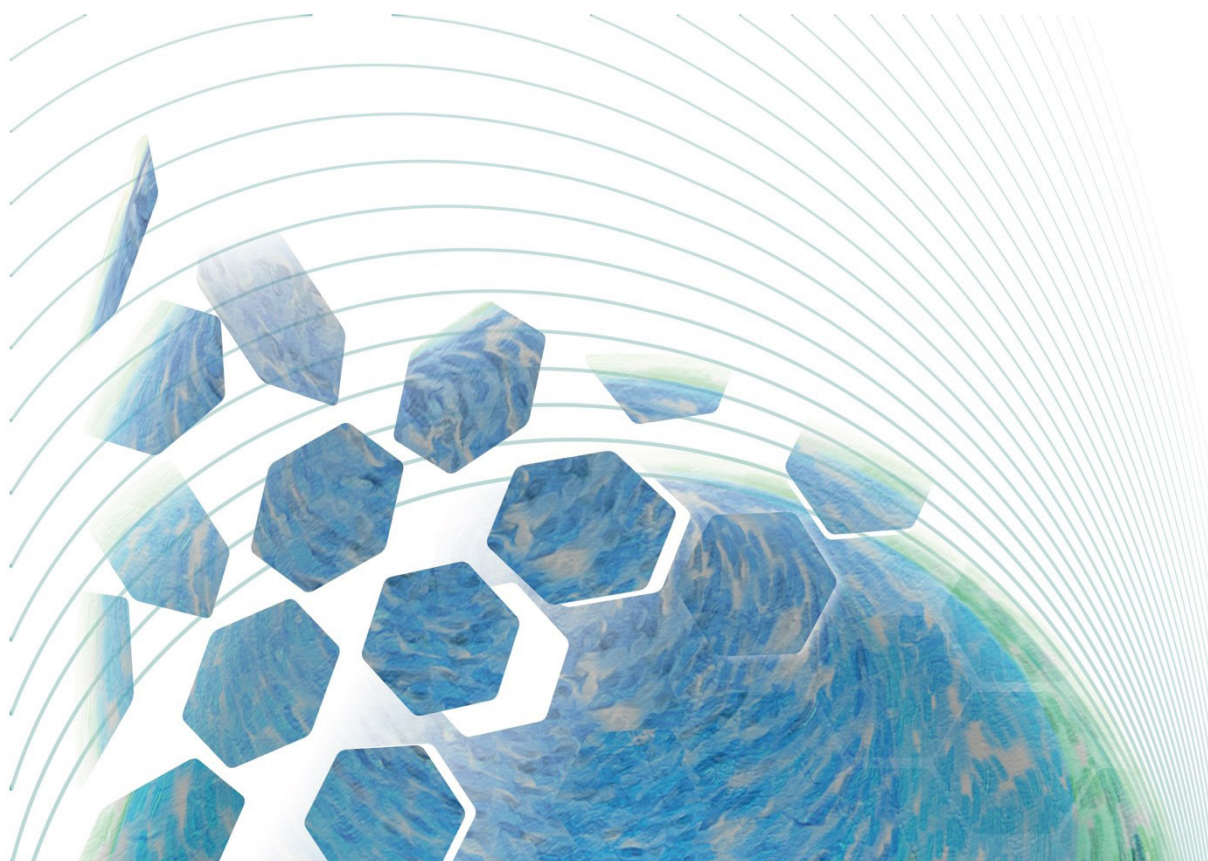
ISSN 2686-9993 (print)
ISSN 2686-7931 (online)

НАУКИ О ЗЕМЛЕ И НЕДРОПОЛЬЗОВАНИЕ

Том
Vol. 46 № 4 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, ВИНТИ РАН. Журнал включен в научную электронную библиотеку CyberLeninka, в базы данных открытого доступа DOAJ, OAJI, в международный каталог периодических изданий Ulrich's Periodicals Directory, в базу данных EBSCO. Журнал распространяется по подписке в каталоге агентства ЗАО ИД «Экономическая газета» «Объединенный каталог. Пресса России. Газеты и журналы», подписной индекс – 41538 (ОК+ЭК) (адрес агентства ЗАО ИД «Экономическая газета»: 8 (499) 1520989; izdatcat@ideg.ru). Статьи, опубликованные в журнале, реферируются и рецензируются. В журнал принимаются статьи по научному направлению «Науки о Земле».

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

Периодичность выхода – 4 раза в год

Учредитель:

ФГБОУ ВО «Иркутский национальный исследовательский технический университет»

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

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

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

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

Korniyakov 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 catalog of JSC "Economic Newspaper" Publishing House "The united catalog. Russian press. Newspapers and journals", the subscription index 41538 (OK+EC) (address of JSC "Economic Newspaper" Publishing House: 8 (499) 1520989; izdatcat@ideg.ru). The articles published in the journal are abstracted and peer-reviewed. The journal accepts articles related to the "Earth sciences" direction.

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

Periodicity: 4 times a year

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

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

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

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

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



СОДЕРЖАНИЕ

Содержание.....	342
-----------------	-----

Геофизика

Константинов К.М., Томшин М.Д., Хороших М.С. Магнитоупругий эффект кимберлитовмещающих пород (Якутская алмазоносная провинция)	344
--	-----

Насыртдинов Б.М., Старовойтов А.В., Хамиев М.М. Результаты аэромагниторазведки с использованием беспилотного воздушного судна на Ромашкинском месторождении углеводородов	364
---	-----

Геология, поиски и разведка твердых полезных ископаемых, минерагения

Горячев Н.А., Будяк А.Е., Михалицына Т.И., Тарасова Ю.И., Горячев И.Н., Соцкая О.Т. Эволюция орогенного золотого оруденения в структурах южного и восточного обрамления Сибирского кратона	374
--	-----

Кузнецова О.В., Качор О.Л., Матюхин И.А., Икрамов З.Л., Паршин А.В. Экспрессный рентгенофлуоресцентный анализ как современная альтернатива традиционным спектральным методам при решении задач геохимических поисков.....	390
---	-----

Горнопромышленная и нефтегазопромысловая геология, геофизика, маркшейдерское дело и геометрия недр

Гилязетдинов Р.А., Кулешова Л.С., Мухаметшин В.В., Якупов Р.Ф., Грищенко В.А. Уточнение результатов решения задач разработки залежей Волго-Уральской нефтегазоносной провинции с использованием методов ранжирования геолого-статистических моделей	402
---	-----

Иванов Е.А., Тальгамер Б.Л. Анализ структуры земель, нарушенных при подземной разработке рудных месторождений	413
---	-----

Ланько А.В., Сарапулова Г.И. Анализ пространственно-временной изменчивости параметров снежного покрова по системе профилей на урбанизированной территории	423
---	-----

Трусова В.В., Качор О.Л., Алексеев А.С., Паршин А.В. Первые результаты применения методов обогащения полезных ископаемых для извлечения металлов из техногенно загрязненных почвогрунтов с существенным содержанием органического вещества	432
--	-----

К сведению авторов.....	445
-------------------------	-----



CONTENTS

Contents	343
-----------------------	------------

Geophysics

Konstantinov K.M., Tomshin M.D., Khoroshikh M.S. Magnetoelastic effect of kimberlite host rocks (Yakutsk diamondiferous province).....	344
Nasyrtdinov B.M., Starovoytov A.V., Khamiev M.M. Unmanned aerial vehicle aeromagnetic survey results on Romashkinskoye hydrocarbon field	364

Geology, prospecting and exploration of solid minerals, minerageny

Goryachev N.A., Budyak A.E., Mikhailitsyna T.I., Tarasova Y.I., Goryachev I.N., Sotskaya O.T. Evolution of orogenic gold mineralization in the southern and eastern framing structures of the Siberian craton	374
Kuznetsova O.V., Kachor O.L., Matyuhin I.A., Ikramovd Z.L., Parshin A.V. Rapid X-ray fluorescence analysis as a modern alternative to traditional spectral methods in geochemical prospecting	390

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

Gilyazetdinov R.A., Kuleshova L.S., Mukhametshin V.V., Yakupov R.F., Grishchenko V.A. Refining solutions of development problems of the Volga-Ural oil and gas province fields using geological and statistical model ranking methods	402
Ivanov E.A., Talgamer B.L. Analysis of the structure of lands disturbed by underground mining of ore deposits	413
Lanko A.V., Sarapulova G.I. Spatial and temporal variability analysis of snow cover parameters according to the urbanized area profile system	423
Trusova V.V., Kachor O.L., Alekseev A.S., Parshin A.V. First results of using mineral concentration methods for metal recover from technogenically contaminated soils with significant organic concentrations	432
Information for the Authors	445



ГЕОФИЗИКА

Научная статья

УДК 550.838.4

EDN: GNUPHH

DOI: 10.21285/2686-9993-2023-46-4-344-363



Магнитоупругий эффект кимберлитовмещающих пород (Якутская алмазоносная провинция)

К.М. Константинов^{a,✉}, М.Д. Томшин^b, М.С. Хороших^c^aИркутский национальный исследовательский технический университет, г. Иркутск, Россия^{a,c}Институт земной коры СО РАН, г. Иркутск, Россия^bИнститут геологии алмаза и благородных металлов СО РАН, г. Якутск, Россия

Резюме. Цель данного исследования заключалась в проведении петро- и палеомагнитных исследований раннепалеозойских пород карбонатного цоколя ряда месторождений алмазов Якутской алмазоносной провинции с целью изучения изменения значений петрофизических параметров в зоне динамического влияния кимберлитовой трубки. Показано, что при формировании кимберлитовых диатрем, сопровождаемых пульсационными, смещающимися кверху взрывами, в кимберлитовмещающей среде возникают поля термоупругих напряжений, характеризующихся эпигенетическими изменениями и связанными с ними петрофизическими неоднородностями (петрофизическими аномалиями). Естественно, что одними из таких петрофизических аномалий являются петромагнитные неоднородности обжига и стресса, в пределах которых кимберлитовмещающие породы под действием термодинамических процессов контрастно изменили свои первоначальные магнитные характеристики. В основном петромагнитные аномалии отражаются в изменении характера анизотропии магнитной восприимчивости: от осадочного до даечного геотипа. Не исключено, что петромагнитные аномалии магнитной восприимчивости будут сопровождаться образованием векторов метакристаллической остаточной намагниченности в кимберлитовмещающих породах. Размеры петромагнитных аномалий (петромагнитных неоднородностей) в плане могут значительно превышать размеры собственно кимберлитовой трубки, что способствует выделению и оконтуриванию наиболее перспективных участков. Кроме того, магнитоупругий эффект может создать вблизи кимберлитовых тел зоны, труднопроницаемые для относительно вязких обогащенных протокристаллами базитовых магм. Это объясняет их выклинивание вдоль петрофизических барьеров: расщепление на маломощные «языки», образование безтрапповых «окон» и «коридоров», торообразных валов с резко возрастающей в интрузивах мощностью и т. п. Обладая относительно повышенными значениями магнитных и плотностных параметров, такие формы магматических образований будут отражаться в наблюдаемых геофизических полях. Таким образом, петро-магнитные аномалии целесообразно рассматривать в качестве важного петрофизического поискового критерия обнаружения коренных кимберлитовых тел.

Ключевые слова: Якутская алмазоносная провинция, базиты, кимберлитовая трубка, трапповые коридоры и окна, петрофизические неоднородности (аномалии) и барьеры, петрофизический поисковый критерий, карбонатный цоколь, анизотропия магнитной восприимчивости

Для цитирования: Константинов К.М., Томшин М.Д., Хороших М.С. Магнитоупругий эффект кимберлитовмещающих пород (Якутская алмазоносная провинция) // Науки о Земле и недропользование. 2023. Т. 46. № 4. С. 344–363. <https://doi.org/10.21285/2686-9993-2023-46-4-344-363>. EDN: GNUPHH.



GEOPHYSICS

Original article

Magnetoelastic effect of kimberlite host rocks (Yakutsk diamondiferous province)

Konstantin M. Konstantinov^{a✉}, Mikhail D. Tomshin^b, Maxim S. Khoroshikh^c

^a*Irkutsk National Research Technical University, Irkutsk, Russia*

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

^b*Diamond and Precious Metal Geology Institute SB RAS, Yakutsk, Russia*

Abstract. The purpose of the research is to conduct petro- and paleomagnetic studies of Early Paleozoic rocks of the carbonate basement of a number of diamond deposits in the Yakutsk diamondiferous province in order to study the changes in petrophysical parameter values in the dynamic influence zone of a kimberlite pipe. It is shown that the formation of kimberlite diatremes accompanied by pulsating explosions shifting upwards brings about thermoelastic stress fields in the kimberlite-bearing medium, which are characterized by epigenetic changes and associated petrophysical heterogeneities (petrophysical anomalies). Petromagnetic heterogeneities of burning and stress are, therefore, some of these petrophysical anomalies, within which kimberlite-bearing rocks have contrastingly changed their original magnetic characteristics under the action of thermodynamic processes. Primarily, petromagnetic anomalies are reflected in the changed nature of the anisotropy of magnetic susceptibility: from sedimentary to dyke geotype. In addition, petromagnetic anomalies of magnetic susceptibility can be accompanied by the formation of metachronous natural residual magnetization vectors in kimberlite host rocks. The dimensions of petromagnetic anomalies (petromagnetic heterogeneities) may significantly exceed the size of the kimberlite pipe itself, which facilitates identification and delineation of the most promising areas. Besides, the magnetoelastic effect can create zones close to the kimberlite bodies that are hardly permeable for relatively viscous, protocystal-rich mafic magmas. This is the reason for their wedging out along petrophysical barriers that is presented by splitting into thin tongues, formation of trap-free windows and corridors, toroidal shafts with sharply increasing thickness in intrusions, etc. Having relatively elevated values of magnetic and density parameters, such forms of igneous formations will be reflected in the observed geophysical fields. Thus, it is reasonable to consider petromagnetic anomalies as an important petrophysical search criterion for the detection of bedrock kimberlite bodies.

Keywords: Yakutsk diamondiferous province, basites, kimberlite pipe, trap corridors and windows, petrophysical heterogeneities (anomalies) and barriers, petrophysical search criterion, carbonate basement, anisotropy of magnetic susceptibility

For citation: Konstantinov K.M., Tomshin M.D., Khoroshikh M.S. Magnetoelastic effect of kimberlite host rocks (Yakutsk diamondiferous province). *Nauki o Zemle i nedropol'zovanie = Earth sciences and subsoil use*. 2023;46(4):344-363. (In Russ.). <https://doi.org/10.21285/2686-9993-2023-46-4-344-363>. EDN: GNUPHH.

Введение

Поиск коренных месторождений полезных ископаемых по первичным ореолам рассеивания химических элементов довольно часто и успешно используется в практике геолого-разведочных работ¹. Первичные ореолы рассеивания месторождений возникают в окружающих горных породах одновременно с формированием залежи полезных ископаемых или становлением рудосодержащей магматической колонны. Первичные ореолы рассеивания повторяют в расширенном объеме контур залежи (магматического тела) и иногда

протягиваются на сотни метров за ее пределы, подчиняясь магматическим, тектоническим, литолого-фациальным, стратиграфическим и структурным признакам, определявшим условия формирования месторождения. Это является благоприятным моментом для прогноза, поисков и разведки месторождения. Формирование первичных ореолов рассеивания сопровождается эпигенетическими изменениями вмещающего рудное тело пространства. В свою очередь, эпигенетические изменения (*от греч. ері – «после, сверх» и genesis – «возникновение»*) являются вторичными про-

¹ Ворошилов В.Г. Геохимические методы поисков месторождений полезных ископаемых: учеб. пособие. Томск: Изд-во ТПУ, 2011. 104 с.



цессами, совершающимися через следующие одно за другим новообразования, которые обуславливают любые изменения минералов и горных пород, в том числе полезных ископаемых после их образования. Особенностью первичных ореолов рассеивания является их зональное строение – направленное и закономерное изменение соотношений между содержаниями элементов, что широко используется при литохимических поисках.

Несмотря на то что литогеохимический метод имеет максимальную разрешающую способность, вопрос о вовлечении в практику поисковых работ на алмазы по методу первичных ореолов рассеивания пока остается открытым [1]². На сегодняшний день из-за специфики формирования коренных место-

рождений алмазов (трубка взрыва) поиск кимберлитовых тел по первичным ореолам рассеивания является менее эффективным, чем по вторичным ореолам. В связи с этим для его применения требуется постановка опытно-методических работ.

В настоящее время проведенные на ряде месторождений алмазов научно-исследовательские работы по изучению кимберлитомещающих пород выявили комплекс признаков первичных ореолов рассеивания, характерных для кимберлитовой природы [2, 3]. Прежде всего к ним относятся изменения, связанные с привносом и консервацией вторичных минералов (рис. 1).

Рассеивание вторичной минерализации в породах околотрубочного пространства по-



Рис. 1. Первичные ореолы рассеивания вблизи месторождения трубки «Ботубинская» [2]:

а – сетчатое и прожилковое осветление (скважина 514-1, интервал 281–285 м);

б – локальные ореолы экстенсивной пиритизации:

- 1 – контур трубки «Ботубинская»; 2 – диагональный разлом; 3 – швы Ботубинского разлома;
- 4 – шов поперечного разлома; 5 – проявления целестиновой минерализации; 6 – мощность экстенсивности пиритизации; 7 – скважины с отсутствием экстенсивной пиритизации или ее мощностью менее 1 м;
- 8 – ореол экстенсивной пиритизации; 9 – взрывные брекчии; 10 – линии скважин

Fig. 1. Primary dispersion halos near the Botuobinskaya pipe deposit [2]:

a – reticulate and veinlet clarification (514-1 well, 281–285 m interval);

b – local halos of extensive pyritization:

- 1 – Botuobinskaya pipe contour; 2 – diagonal fault; 3 – Botuoba fault sutures;
- 4 – transverse fault suture; 5 – manifestations of celestine mineralization; 6 – pyritization extensiveness thickness; 7 – wells lacking extensive pyritization or pyritization thickness of less than 1 m;
- 8 – extensive pyritization halo; 9 – explosive breccias; 10 – well lines

² Серов И.В., Граханов О.С., Кошкарёв Д.А., Агеенков Е.В., Бояров В.М., Герасимчук А.В. [и др.]. Прогнозирование и поиски коренных месторождений алмазов на Сибирской платформе: метод. пособие / под ред. А.В. Толстова. Мирный: Изд-во АК «АЛРОСА», 2020. 155 с.



мимо их литолого-фациальных особенностей зависит от давления, связывающего процесс кимберлитовнедрения со взрывными явлениями [4–7]. В ходе взрыва происходит уплотнение пород в околотрубочном пространстве, возникновение в них полей термоупругих напряжений на подобии тех, что возникают в результате подземного ядерного взрыва. В процессе становления кимберлитовой трубки вмещающие породы вблизи от контакта диатремы могут испытывать разного типа тектонические деформации на макро- (рис. 2) и

микроуровнях (рис. 3). Но если первые, как правило, располагаются вблизи (первые метры) от контакта с диатремой, то вторые могут распространяться на более значительные расстояния (см. рис. 1, b).

Таким образом, согласно имеющейся информации, важно отметить следующие моменты:

– формы и размеры первичных ореолов рассеивания могут заметно варьировать, что зависит от особенностей геологического строения той или иной кимберлитовой трубки (месторождения);



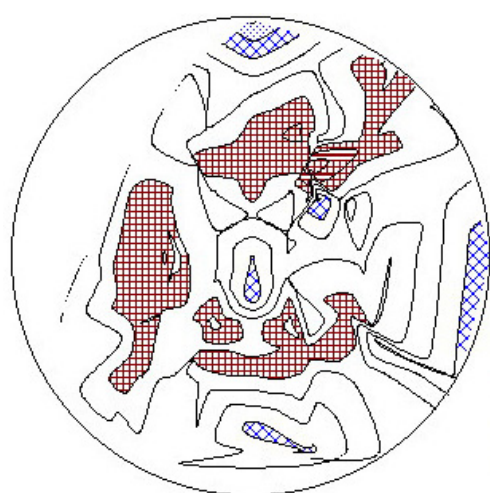
a



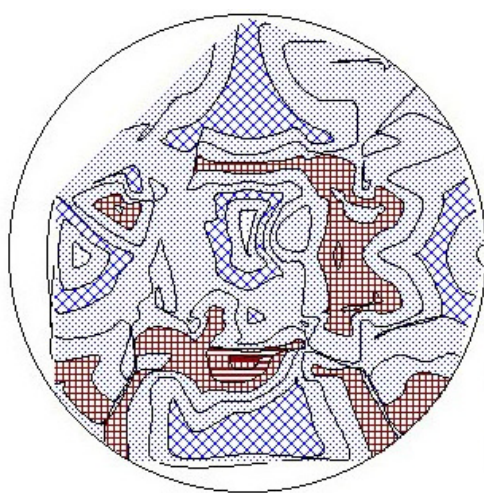
b

Рис. 2. Приконтактные деформации пород карбонатного цоколя на контакте с кимберлитами трубками «Айхал» (a) и «Комсомольская» (b)

Fig. 2. Near-contact deformations of carbonate basement rocks at the contact with Aikhal kimberlite pipe (a) and Komsomolskaya kimberlite pipe (b)



a



b

Рис. 3. Диаграммы, отражающие ударный характер деформаций кимберлитовмещающих пород на месторождении трубки «Нюрбинская» [3]:

a – долерит на контакте с кимберлитами (образец Н-16-150-306, глубина отбора – 306 м);
b – перекристаллизованный доломит в околотрубочном пространстве (образец 568-421-185, глубина отбора – 185 м)

Fig. 3. Diagrams reflecting the shock nature of kimberlite rock deformations at the Nyurbinskaya pipe deposit [3]:

a – dolerite at the contact with kimberlites (sample H-16-150-306, sampling depth – 306 m);
b – recrystallized dolomite in the near-pipe space (sample 568-421-185, sampling depth – 185 m)



– логично предположить, что окружающие рудные тела эпигенетически измененные горные породы могут менять и свои исходные физические свойства (плотность, намагниченность, проводимость и т. п.). Так возникают петрофизические неоднородности или петрофизические аномалии – часть геологического пространства (таксон), в котором наблюдаются изменения первоначальных магнитных характеристик горных пород в результате воздействия различных физико-химических процессов [8–10]. Их вещественная регистрация является актуальной для петрофизических исследований с целью обоснования построения петрофизической модели [11] и выбора на ее основе соответствующего физическим эффектам оптимального комплекса геофизических методов поиска месторождений полезных ископаемых по петрофизическим неоднородностям или аномалиям. В этой связи необходимо показать практическую возможность одного из петрофизических параметров по обнаружению петрофизических неоднородностей или аномалий околотрубочного пространства и связанных с ним потенциальных геофизических полей.

Цель проведенного исследования состояла в повышении качества поисковых геолого-геофизических работ на основе изучения петрофизических неоднородностей или аномалий. Основная задача заключалась в выборе петрофизических методов, способных фиксировать тонкие изменения значений физических параметров кимберлитовмещающих пород.

Материалы и методы исследования

С начала алмазопроисловых работ в Якутской алмазонасной провинции постоянно ведутся петрофизические исследования всех структурно-вещественных комплексов, в том числе вмещающих кимберлиты терригенно-карбонатных пород [12]. В основном изучение физических свойств проведено по результатам геофизических исследований скважин (каротаж), лабораторных измерений керна и образцов, отобранных в ходе геологических маршрутов. В комплекс изучения физических свойств горных пород входят измерения объемной плотности, магнитной восприимчивости, естественной остаточной намагниченности, удельного электрического сопротивления, проводимости, радиоактивности и др.

В процессе проведения петрофизических исследований структурно-вещественных комплексов Якутской алмазонасной провинции собран уникальный материал по магнитным свойствам горных пород. Для изучения этих параметров использовались ориентированные в современной системе координат образцы [13] (ориентированный образец – образец горной породы, положение которого определено в пространстве), которые отбирались с помощью горного компаса из горных пород с ненарушенными элементами залегания в естественных и искусственных обнажениях.

Опыт петрофизических работ показал, что первичные измерения тех или иных физических параметров не всегда подходят для решения поставленной задачи, что объясняется их большой дисперсией. Поэтому нам следует остановиться на прецизионных методах, которые позволяют однозначно интерпретировать полученные материалы и в то же время являются высокопроизводительными. К ним можно отнести следующие магнитометрические анализы [14], которые вполне реально выполнять в производственных условиях.

1. Анизотропия магнитной восприимчивости (АМВ) [15, 16]. Несмотря на то что измерение магнитной восприимчивости χ входит в комплекс методов каротажа поисковых скважин, ее анизотропия ранее не изучалась. Метод изучения АМВ может быть востребован для измерения петроструктуры горных пород с целью определения их происхождения и эволюции. Более наглядно АМВ можно представить в виде эллипсоида, где она достигает наивысшей интенсивности вдоль длинной оси K_1 , а наименьшей – вдоль короткой оси K_3 (рис. 4).

Традиционно используемый параметр величины АМВ представляет собой отношение максимального и минимального значений восприимчивости, именуемое степенью анизотропии:

$$P = P_2 = K_1 / K_3.$$

Эксцентриситет эллипсоида можно выразить несколькими способами, главным образом – через отношение осевых значений или через их разность. В основе ранее введенных параметров лежит отношение. Например, параметр линейности P_1 и плоскости P_3 :

$$P_1 = L = K_1 / K_2; \\ P_3 = F = K_2 / K_3.$$

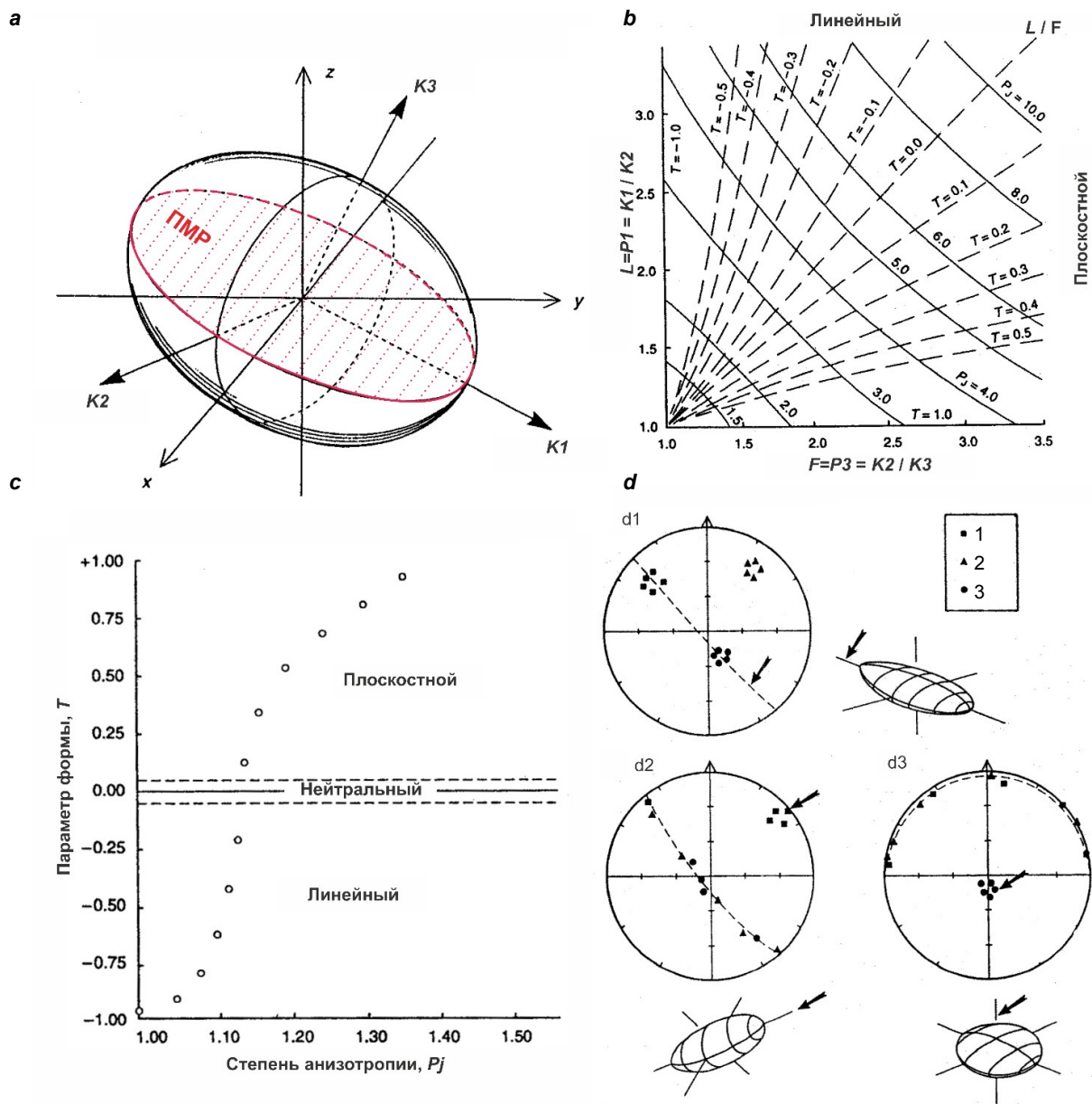


Рис. 4. Теоретические представления данных по изучению магнитной текстуры горных пород:

a – эллипсоид анизотропии с ортогональными осями, то есть длинной K_1 , средней K_2 и короткой K_3 – тензор, с помощью которого определяется анизотропия магнитной восприимчивости образца;

b – график зависимости степени анизотропии P_j и формы T от линейности L и плоскости F ;

c – график зависимости параметра формы T и степени анизотропии P_j ;

d – стереограммы данных по направлениям эллипсоида анизотропии магнитной восприимчивости образца: для трехмерных эллипсоидов (d_1) с одинаковой ориентацией три главные оси образуют ясно различимые группы; для удлинённых эллипсоидов (d_2) с одинаковой ориентацией длинные оси сгруппированы, а средние и короткие распределены по цепочке под углом 90° к длинным осям; у сплюснутых эллипсоидов (d_3) с одинаковой ориентацией сгруппированы короткие оси, тогда как длинные и средние располагаются по окружности под углом 90° к коротким осям (1 – максимальная ось K_1 ; 2 – средняя ось K_2 ; 3 – минимальная ось K_3)

PMP – плоскость магнитного расслоения

Fig. 4. Theoretical presentation of data on rock magnetic texture study:

a – anisotropy ellipsoid with orthogonal axes (long K_1 axis, medium K_2 axis and short K_3 axis) – a tensor, which is used to determine the anisotropy of the magnetic susceptibility of the sample;

b – P_j anisotropy degree and T shape vs L linearity and F plane graph;

c – T shape parameter vs P_j anisotropy degree graph;

d – data stereograms along the directions of the anisotropy ellipsoid of magnetic susceptibility of the sample: three main axes form clearly distinguishable groups for the three-dimensional ellipsoids (d_1) with the similar orientation; the long axes are grouped and the middle and short axes are cascaded at the angle of 90° to the long axes for elongated ellipsoids (d_2) with the similar orientation; the short axes are grouped, while the long and medium axes are located around the circumference at the angle of 90° to the short axes for oblate ellipsoids (d_3) with the similar orientation (1 – K_1 maximum axis; 2 – K_2 middle axis; 3 – K_3 minimum axis)

PMP – magnetic separation plane



Для определения параметра формы T эллипсоида анизотропии используется формула

$$T = \left[\frac{2\ln(K_2/K_3)}{\ln(K_1/K_3)} \right] - 1.$$

Эллипсоиды сплюсненной формы имеют положительные значения ($0 < T \leq 1$), тогда как отрицательные значения ($-1 \leq T < 0$) характерны для тел удлинённой формы (см. рис. 4, с). Для нейтральных эллипсоидов, по форме напоминающих так называемые плоскодеформированные эллипсоиды: $T = 0$, отсюда $P_j = P$.

Большой массив данных анизотропии можно представить в виде специальных графиков. При изучении магнитной анизотропии в особых целях используются графики зависимости линейности ($L = P_j$ или $\ln L$) от плоскости ($F = P_3$ или $\ln F$), так как эти графики (см. рис. 4, b) аналогичны графикам деформаций, обычно применяемым в структурной геологии. На графиках данного типа эксцентрические эллипсоиды наиболее удалены от начала координат, тела сплюсненной формы располагаются под прямой единичного градиента, а тела удлинённой формы – над ней. Кроме того, определить величину анизотропии структуры и ее форму наилучшим образом можно через параметры P_j и T . Оба параметра сопоставимы на графике (см. рис. 4, с), где P_j расположен вдоль горизонтальной оси ($1 < P_j$), а T – вдоль вертикальной ($-1 < T < 1$). Подобные графики позволяют четко различать величину и форму по линейному изменению значений на различных отрезках. По этой же причине график зависимости P_j от T рекомендуется использовать в структурных исследованиях, поскольку благодаря своей способности отображать АМВ он в равной степени применим и при изучении деформаций. Несмотря на общий характер применения графиков данного типа, существует мнение, что графики P_j – T лучше отображают зависимость между формой и степенью анизотропии или деформации, поскольку они дают более четкое представление об эксцентриситете (степени деформации) и симметрии эллипсоида (сплюсненный или удлинённый). Зависимость между P_j и деформацией различна для разных типов пород, видов деформации и т. п.

Направления главных осей эллипсоида АМВ обычно указываются на равновеликой стереограмме нижнего полушария (см. рис. 4, d). Такие

стереограммы дают возможность быстро различать трехмерные, сплюсненные и удлинённые эллипсоиды, а также позволяют наносить их на график одновременно с другими характерными признаками. К наиболее значимым из них относится плоскость магнитного расслоения, которую образуют большие оси K_1 и K_2 (см. рис. 4, а). По плоскости магнитного расслоения эллипсоида АМВ можно оценить элементы залегания объекта, направление и относительную скорость движения материала. Кроме того, удобно совмещать и анализировать стереограммы векторов намагниченности со стереограммами элементов структурной геологии (простирающие породы, кливаж, трещиноватость и т. п.).

2. Измерения векторов естественной остаточной намагниченности (ЕОН, ln) ведутся только в лабораторных условиях [13]. Согласно «гипотезе сохранения», приобретенная первичная намагниченность сохраняется до настоящего времени и принципиально может быть выделена из суммарной многокомпонентной ЕОН. Гипотеза предполагает, что вектор ln может содержать ряд остаточных намагниченностей, приобретенных горными породами за все время своего существования (рис. 5). Поэтому при компонентном анализе ln горных пород мы можем столкнуться с несколькими ее разновидностями, которые классифицируются: по генезису – ориентационная lno , термоостаточная lnt , химическая lnc , вязкая lnv и др.; по отношению к складчатости – до- ln^a , син- ln^s или постскладчатая ln^p ; по времени образования – первичная ln^0 и метакронная ln^m . Первичная (синхронная) остаточная намагниченность ln^0 – начальная остаточная намагниченность, синхронная начальной стадии образования горной породы и полностью или частично сохранившаяся в составе ЕОН к моменту измерения образцов³. Метакронная остаточная намагниченность ln^m – хронологически вторичная (наложенная) компонента ЕОН любого происхождения, время образования которой заметно отдалено от времени первичного формирования горной породы³. Например, ln^0 может быть ориентационной или термоостаточной и одновременно доскладчатой. Вектор ln^m может возникнуть химическим путем или под действием динамических нагрузок (Виллари-эффект) до, в процессе или после складкообразования и т. п.

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



Таким образом, современная магнитная «память» горных пород может одновременно содержать некоторое множество палеомагнитных векторов (компонент) ЕОН:

$$I_n = I_n^0 + I_n^m + \dots + I_n^N,$$

которые в силу «гипотезы фиксации» (горные породы при своем становлении намагничиваются по направлению магнитного поля времени и места их образования) могут нести определенную информацию о сформировавших их геологических процессах. Любая вышеперечисленная компонента может быть выделена

из суммарной многокомпонентной I_n в ходе лабораторных экспериментов по размагничиванию переменным магнитным полем и температурой. Считается, что I_n^0 является самой магнитоустойчивой (высококоэрцитивной и высокотемпературной) компонентой по отношению к другим ее видам. Но в природе часто магнитная запись горных пород о событиях далекого прошлого может быть замаскирована или полностью стерта другими видами I_n , связанными с более поздними физико-химическими или геологическими процессами. Компоненты век-

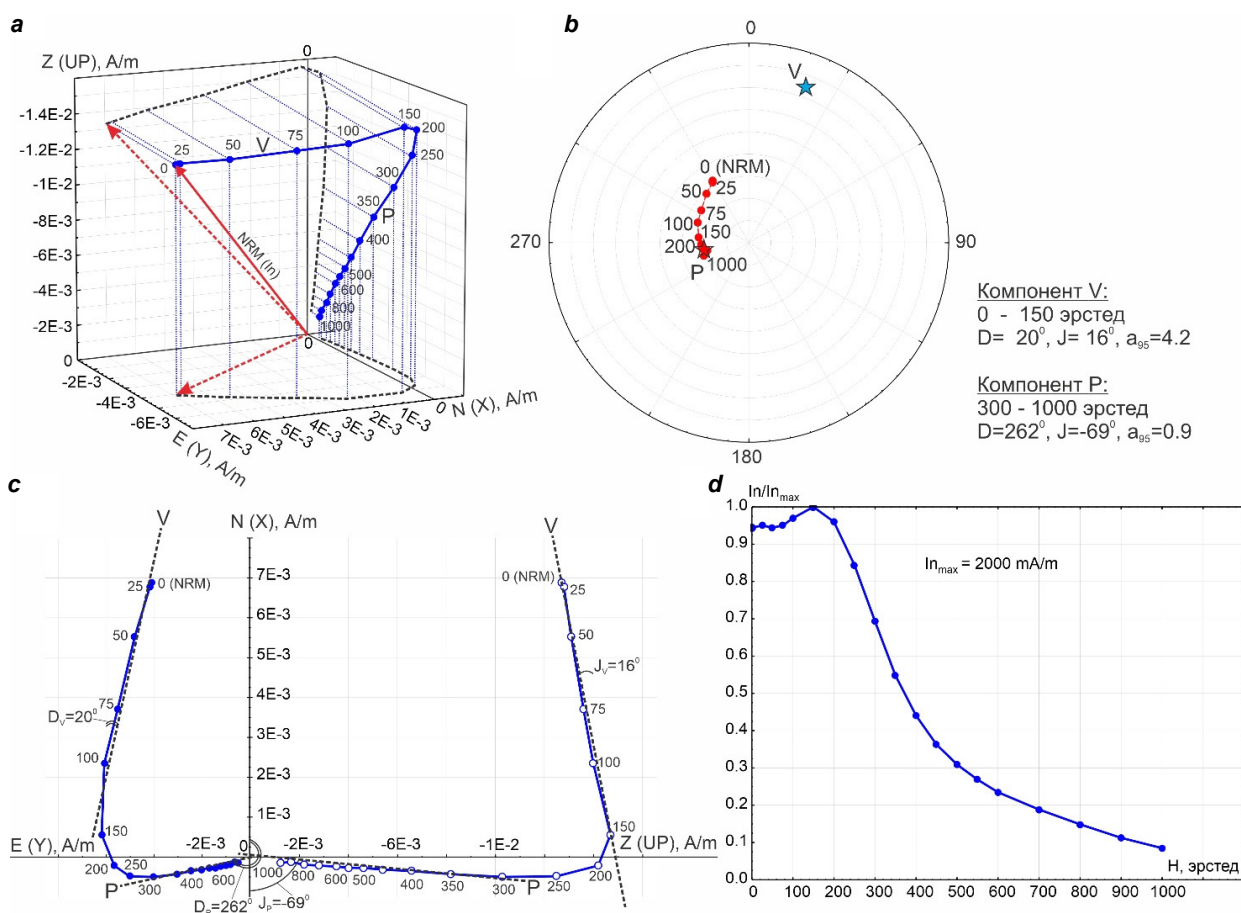


Рис. 5. Компонентный анализ вектора естественной остаточной намагниченности (NRM, I_n) долеритов Алакитского силла по результатам размагничивания переменным магнитным полем:
а – аксонометрическое изображение I_n ; б – стереографическая проекция: красные/синие фигурки – проекции вектора I_n на отрицательную/положительную полусферу, цифры – величина переменного магнитного поля H, звездочки – компоненты I_n низкокоэрцитивная V (вязкая I_n^v) и высококоэрцитивная P (возможно, первичная I_n^0) соответственно; в – диаграмма Зийдверelda: заштрихованные и полные кружочки – проекции I_n на плоскости (эпюры) XOY и XOZ соответственно, цифры – величина переменного магнитного поля, пунктирные линии – направления компонент V и P; г – график размагничивания I_n от H, нормированный по $I_n(\max)$

Fig. 5. Component analysis of the natural remanent magnetization vector (NRM, I_n) of the Alakit sill dolerites based on the results of demagnetization by an alternating magnetic field:

а – I_n axonometric image; б – stereographic projection: red/blue figures – I_n vector projections on the negative/positive hemisphere, numbers – the magnitude of the H alternating magnetic field, asterisks – I_n components: low-coercivity V (viscous I_n^v) and high-coercivity P (possibly primary I_n^0) components respectively; в – Zijderveld diagram: solid and open circles are I_n projections on the XOY and XOZ plane (diagrams), respectively, numbers show the magnitude of the alternating magnetic field, dotted lines – V and P component directions; г – I_n vs H demagnetization graph normalized by $I_n(\max)$



тора In , которые претендуют на последующее получение палеомагнитного результата (то есть могут оказаться синхронным изучаемому геологическому событию прошлого), принято обозначать как характеристические (In^{ch}) [17]. Характеристическая остаточная намагниченность In^{ch} – наиболее стабильная компонента ЕОН, выделенная в ходе магнитной чистки, на диаграмме Зийдervельда идущая в нуль. Для датировки и оценки природы характеристической остаточной намагниченности необходим комплекс дополнительных исследований³.

Обычно In^{ch} определяют по прямым, стремящимся в центр диаграммы Зийдervельда (см. рис. 5, а, с). По результатам компонентного анализа векторов ЕОН определялись устойчивые группировки (кластеры) векторов In^{ch} : компоненты V и P (см. рис. 5, а–с).

Для доказательства природы In^{ch} необходим комплекс, позволяющий в той или иной мере однозначно определить величину и направление геомагнитного поля в точке исследований, привязанное ко времени некоторого геологического события. Комплекс включает три группы признаков: геологические, физические и геофизические³.

В общем, предложенные АМВ и палеомагнитные методы позволяют установить для кимберлитовмещающих пород изменение петроструктуры и относительное время проявления наложенных процессов соответственно.

Результаты исследования и их обсуждение

В ходе многолетних петрофизических исследований для кимберлитовмещающих образований раннего – среднего палеозоя

Якутской алмазоносной провинции основным минералом-носителем намагниченности является гематит с точками Кюри 650–670 °С (рис. 6).

Для эпигенетически стерильных пород терригенно-карбонатного цоколя характерен «осадочный» геотип АМВ: плоскость магнитного расслоения субгоризонтальная, параметр формы T стремится к 1, а $F \gg L$ (рис. 7, а) [19]. Стереограмма и параметры P , T , F и L песчаников, отобранных из керна вертикальных скважин, также имеет «осадочный» тип, но только в этом случае большие оси $K1$ и $K2$, хоть и образуют субгоризонтальную плоскость магнитного расслоения, но не будут зафиксированы по склонению из-за вращения образца в керноприемнике при бурении (рис. 7, b).

На ряде месторождений алмазов кимберлитовмещающие образования приобретают «гибридный» геотип АМВ: «осадочный» плюс «даечный» (рис. 7, с). Характерный «даечный» геотип АМВ (плоскость магнитного расслоения субвертикальная, соответствует формированию дайки), согласно нашим экспериментальным исследованиям [9, 10], в осадочных породах может сформироваться в результате стресса (виллари-эффект, т. е. изменение намагниченности ферромагнетиков под давлением – эффект, обратный явлению магнитострикции) (рис. 7, d).

Таким образом, изменение «осадочного» геотипа АМВ на другие геотипы, не характерные для первичной литологической текстуры, например, «гибридный» геотип, будет означать влияние давления (стресса) со стороны внедрения кимберлитовой трубки.

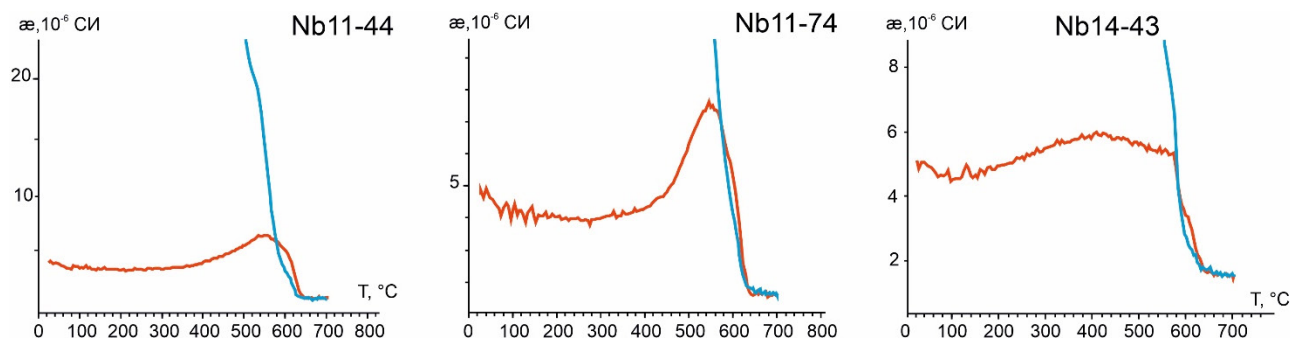


Рис. 6. Термомагнитогаммы магнитной восприимчивости терригенно-карбонатных образований кимберлитовой трубки «Нюрбинская» [18]:

Красные/синие кривые – процесс нагрева/охлаждения образца

Fig. 6. Thermomagnetograms of magnetic susceptibility of Nyurbinskaya kimberlite pipe terrigenous-carbonate formations [18]:
Red/blue curves show heating/cooling process of the sample

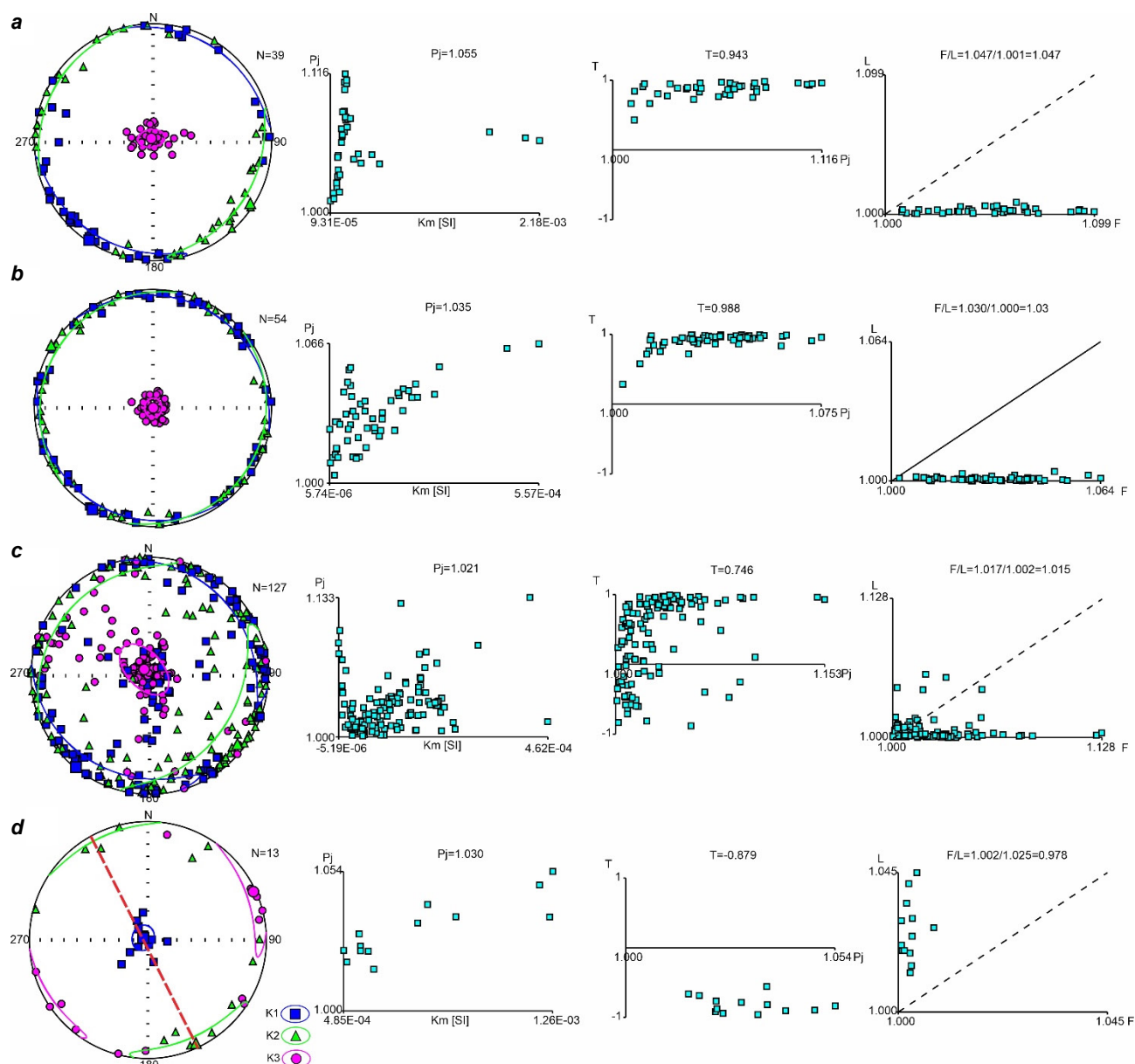


Рис. 7. Анизотропия магнитной восприимчивости терригенно-осадочных горных пород Якутской алмазодиферной провинции [18, 19]:

a, d – алевро-песчаники аппайнской свиты р. Ыгыатты (a – обнажение 10-24; d – обнажение 10-26);
b – терригенно-карбонатные образования, вмещающие кимберлитовую трубку «Заполярная»
(гидрогеологическая скважина 501Г, месторождение Верхнемунское);
c – терригенно-карбонатные образования, вмещающие кимберлитовую трубку «Нюрбинская»
Красная штриховая линия – плоскость магнитного расслоения

Fig. 7. Anisotropy of magnetic susceptibility of terrigenous-sedimentary rocks of the Yakutsk diamondiferous province [18, 19]:

a, d – silt-sandstones of the Appain formation of the Ygyatty river (a – outcropping 10-24; d – outcropping 10-26);
b – terrigenous-carbonate formations hosting the Zapolyarnaya kimberlite pipe
(hydrogeological well 501G, Verkhnemunskoye field);
c – terrigenous-carbonate formations hosting the Nyurbinskaya kimberlite pipe
Red dashed line indicates a magnetic separation plane

Теперь рассмотрим, как изменяется компонентный состав векторов ЕОН на разном удалении от контакта кимберлитовой трубки. Для начала отметим, что для кимберлитов трубки

«Нюрбинская» (образец Nrb14-32t2) характерны пологие отрицательные векторы ЕОН в север-северо-восточном румбах – высокотемпературная (550–570 °C) магнетитовая компо-



нента M (рис. 8, а) [18]. В то же время векторы ЕОН кимберлитовмещающих пород содержат разные компоненты:

1. В образце Nrb15-125t2, удаленном на более чем 100 м, четко выражен однокомпонентный (Hm) состав векторов ЕОН до блокирующих температур до 700–705 °С (рис. 8, b).

2. У образца Nrb11-46t2, расположенного в пределах от 30 до 70 м от контакта трубы, установлен двухкомпонентный состав векторов ЕОН. Выделяются средне- и высокотемпературные векторы ЕОН (рис. 8, c), соответственно, магнетитовая M (300–500 °С) и гематитовая (575–700 °С). Понятно, что последняя – первичная осадочной природы (Hm), а первая – метаксонная (M) – определена кимберлитовой природой.

3. В образце Nrb14-10t3, отобранном непосредственно из экзоконтакта трубы, обнаружены две компоненты вектора ЕОН (рис. 8, d) – пирротиновая P (200–350 °С) и магнетитовая (350–500 °С). Несмотря на то что компонента P значительно превосходит компоненту M , их направления совпадают. Пирротиновая компонента P явно сформировалась за счет инфильтрации и консервации во вмещающие породы кимберлитового расплава.

Палеомагнитные данные по трубке «Нюрбинская» следует рассматривать в качестве геофизического теста «контакта» [13], доказывающего первичную природу и возраст векторов ЕОН кимберлитов. Их следы (компонента M) сохранились в кимберлитовмещающих породах и свидетельствуют о существенном влиянии процессов кимберлитовнедрения.

Проведенные исследования установили, что в терригенно-осадочных образованиях вокруг кимберлитовых трубок формируются не только первичные ореолы рассеивания химических элементов и минералов (см. рис. 1), но и «первичные ореолы» изменения петрофизических параметров: петрофизические неоднородности или петрофизические аномалии – это часть геологического пространства (таксон), в котором наблюдаются изменения первоначальных физических (плотностных, магнитных и пр.) характеристик горных пород в результате воздействия различных физико-химических процессов, в том числе связанных с внедрением кимберлитов [8–10, 12]. Поскольку эти изменения происходят на микро- и наноуровнях, то необходимо разра-

ботать надежную методику их регистрации и интерпретации. Например, первичные измерения α или кажущегося удельного электрического сопротивления ρ_k в силу большой дисперсии значений этих параметров не всегда могут быть однозначными, то применение прецизионных методов исследования (анизотропия различных физических параметров, компонентный анализ ЕОН) по сравнению с ними более информативны.

В ходе специальных петро- и палеомагнитных исследований было наглядно показано влияние давления и температуры на окружающее кимберлитовые трубки терригенно-осадочные образования (см. рис. 7, 8). Смена АМВ с «осадочного» геотипа на «гибридный» или «дачный» как раз и является следствием термоупругих напряжений и связанного с ними сейсмомагнитного (тектономагнитного) эффекта [9, 10]. Термоупругие напряжения, в зависимости от компетентности литологического разреза, могут распространяться на разные расстояния от кимберлитовой трубы. Эти напряжения также будут сопровождаться изменениями магнитной текстуры и структуры, что мы и надежно регистрируем в образцах в отличие от собственно объемной плотности. Петрофизические неоднородности или петрофизические аномалии постепенно исчезают и переходят в «стерильные» («фоновые») образования. Этот количественный переход (зависит от технических возможностей аппаратуры) от «аномальных» к «фоновым» является «петрофизическим барьером», который можно наблюдать на микро- или наноуровнях. Первые, как результат инфильтрации и консервации флюидов во вмещающие породы (см. рис. 1), могут также регистрироваться при литохимических поисках¹ [1]. Вторые характеризуются более тонкими эффектами и поэтому могут распространяться на значительно более существенные расстояния по сравнению с первыми. Таким образом, кимберлитовмещающие образования могут нести информацию, связанную с нахождением поблизости кимберлитовой трубы (рис. 9) [19].

С другой стороны, петрофизические неоднородности или аномалии стресса могут создавать плотностные барьеры во вмещающих породах, на которые чутко реагируют и более молодые магматические образования. Известны многочисленные случаи⁴ [20, 21], когда вблизи

⁴ Никулин В.И., Лелюх М.И., Фон-дер-Флаасс Г.С. Алмазпрогностика (концепция и методология): метод. пособие. Иркутск: Изд-во НПФ «Алмаз-Прогноз», 2002. 320 с.

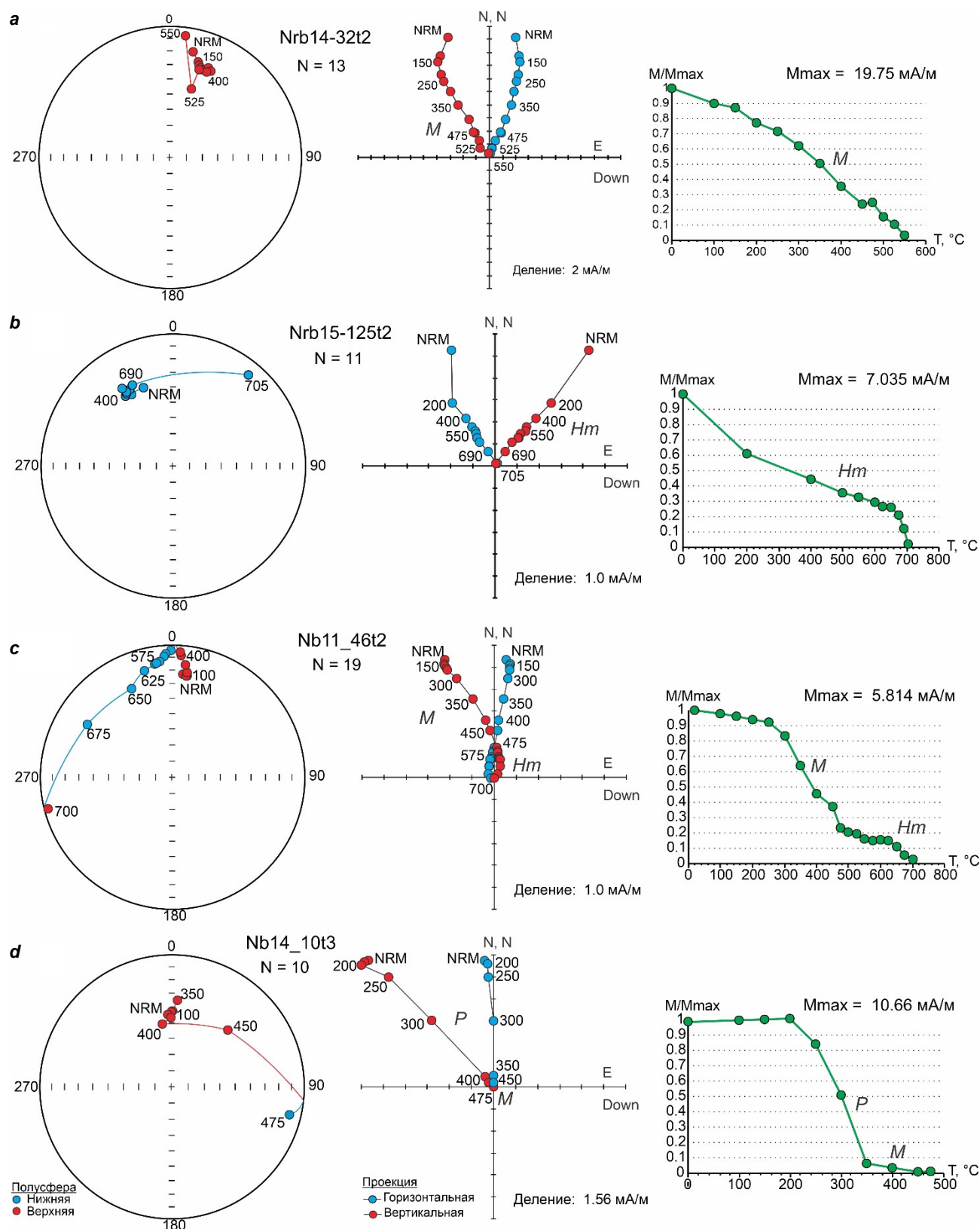


Рис. 8. Изучение компонентного состава естественной остаточной намагниченности образцов кимберлитов (а) и вмещающих пород (б–д) трубки «Нюрбинская» (гематитовая Hm – первичная, магнетитовая M и пирротитовая P – метасинхронные)

Fig. 8. Study of the component composition of natural residual magnetization of the samples of kimberlites (a) and host rocks (b–d) of the Nyurbinskaya pipe (hematite Hm – primary component, magnetite M and pyrrhotite P – metachronous component)

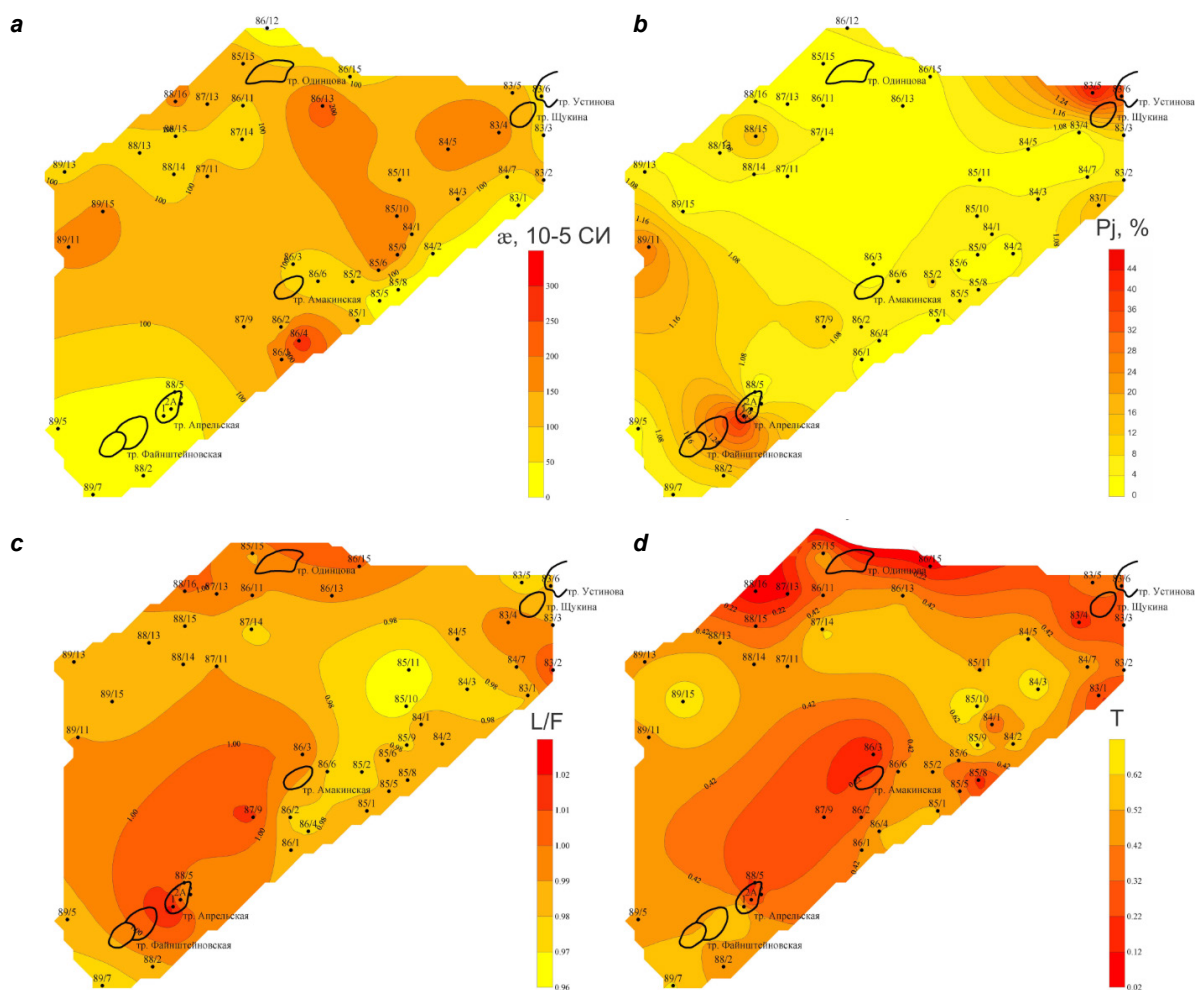


Рис. 9. Планы изотроп параметров анизотропии магнитной восприимчивости пород карбонатного цоколя участка «Полигон» [19]:

a – магнитной восприимчивости; b – степени анизотропии; c – отношения линейной анизотропии к плоскостной; d – параметра формы эллипсоида анизотропии

Fig. 9. Views of isotropic parameters of magnetic susceptibility anisotropy of carbonate basement rocks of the Polygon site [19]:

a – magnetic susceptibility; b – degrees of anisotropy; c – ratio of linear anisotropy to planar anisotropy; d – anisotropy ellipsoid shape parameter

кимберлитов в силах долеритов происходит резкое двух-, трехкратное увеличение их мощности, изменение своего первоначально горизонтального залегания с задирианием вверх, могут сминаться («гормошиться») и щепиться на маломощные «языки», а в особых случаях образуют «трапповые окна» и даже «трапповые коридоры» (рис. 10) [22]. Особенно эти явления характерны для двух последних фаз базитового магматизма восточного фланга Тунгусской синеклизы [23]. Их особенностью является то, что вышезалегающая ранняя фаза была намагничена положительно, а ниже залегающая поздняя фаза – отрицательно [8, 24, 25]. Последняя перемагничивает все

ранние геологические образования (включая кимберлиты и базиты), создавая в них петромагнитные неоднородности или аномалии обжига и стресса [10].

Исходя из опыта геолого-геофизических работ на территориях 4 и 5 алмазопромышленных геотипов поиск кимберлитовых тел по аномалиям «трубчатого» типа малоэффективен². В этом случае решение проблемы может быть получено косвенным путем – по аномалиям «структурного» типа [26]. К этому типу как раз можно отнести гравимагнитные аномалии, создаваемые пермотриасовыми траппами в зоне динамического влияния кимберлитовой трубки⁴ [20–22]. Характерные геолого-петро-

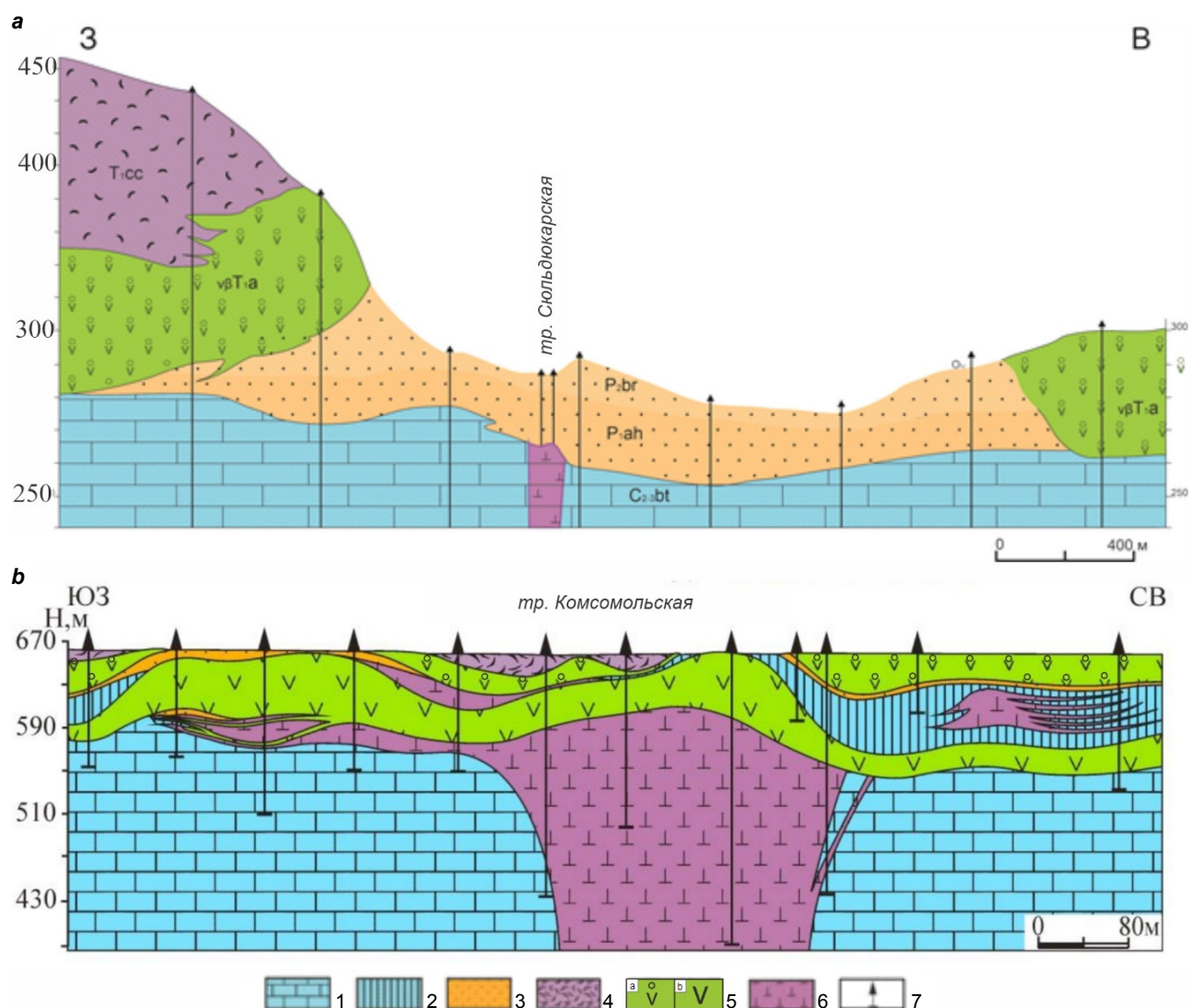


Рис. 10. Схематический геологический разрез поведения траппов [22]:

- a* – второго петрохимического типа возле кимберлитовой трубки «Сюльдюкарская»;
b – второго и третьего петрохимического типов, бронирующих кимберлитовую трубку «Комсомольская»:
 1 – нижнепалеозойские терригенно-карбонатные отложения; 2 – перемещенные блоки нижнепалеозойских пород; 3 – пермские терригенные отложения; 4 – триасовые туфовые образования; 5 – траппы
 (*a* – II петрохимический тип, *b* – III петрохимический тип); 6 – кимберлиты; 7 – скважины

Fig. 10. Schematic geological section of trap behavior [22]:

- a* – second petrochemical type near the Syuldyukarskaya kimberlite pipe;
b – second and third petrochemical types reserving the Komsomolskaya kimberlite pipe:
 1 – Lower Paleozoic terrigenous-carbonate deposits; 2 – transported Lower Paleozoic rock blocks;
 3 – Permian terrigenous deposits; 4 – Triassic tuff formations; 5 – traps
 (*a* – II petrochemical type, *b* – III petrochemical type); 6 – kimberlites; 7 – wells

физические признаки базитов, выклинивающихся на флангах кимберлитовых тел (см. рис. 10), должны отражаться и в геофизических (гравимагнитных) полях.

На рис. 11, а, с приведены варианты физико-геологических моделей разных структурных обстановок, которые могут иметь значение для поисков кимберлитов или перспективных на их обнаружение участков в процессе интерпретации данных геофизических съемок. Для их

идентификации необходимо решить прямую задачу геофизики по расчету ожидаемых аномальных эффектов от траппов. При физико-геологическом моделировании и анализе характера поведения траппов и их отражения в гравимагнитных полях использована программа ModelVisionPro-17.5 (Encom Technology, Австралия). Она позволяет строить петрофизические 3D-модели и сравнивать их имитированные характеристики с данными полевых наблюдений.



Программа автоматизирует процесс прямого моделирования, что позволяет проверить решение о пригодности той или иной детерминированной физико-геологической модели, а также предсказать некоторые свойства объектов. При построении петрофизических моделей использовались данные о физических свойствах горных пород (таблица) [12, 24, 25, 27]. Поскольку наши усилия сосредоточены на исследовании размещения траппов в верхней части разреза, то в процессе моделирования мы исходили из принципа, что объект поисков (кимберлиты) характеризуется слабо контрастными аномалиями на фоне вмещающих пород, в то время как объекты помех (разнофазные траппы) получили среднестатистические значения объемной

плотности и намагненности (см. таблицу).

В результате физико-геологического моделирования показан характер отражения траппов на флангах кимберлитовых тел. При резком выклинивании (см. рис. 10, а) они могут создавать в потенциальных полях гравитационные «ступени», контролирующиеся, в зависимости от знака намагненности, резкими положительными или отрицательными аномалиями (см. рис. 11, а, b).

В случае развития над кимберлитовой трубкой двух базитовых фаз внедрения (см. рис. 10, b) мы можем наблюдать аномалию «структурного» типа антиподную «трубочно-му» типу. Это объясняется тем, что силл долеритов третьей фазы, почувствовав перед

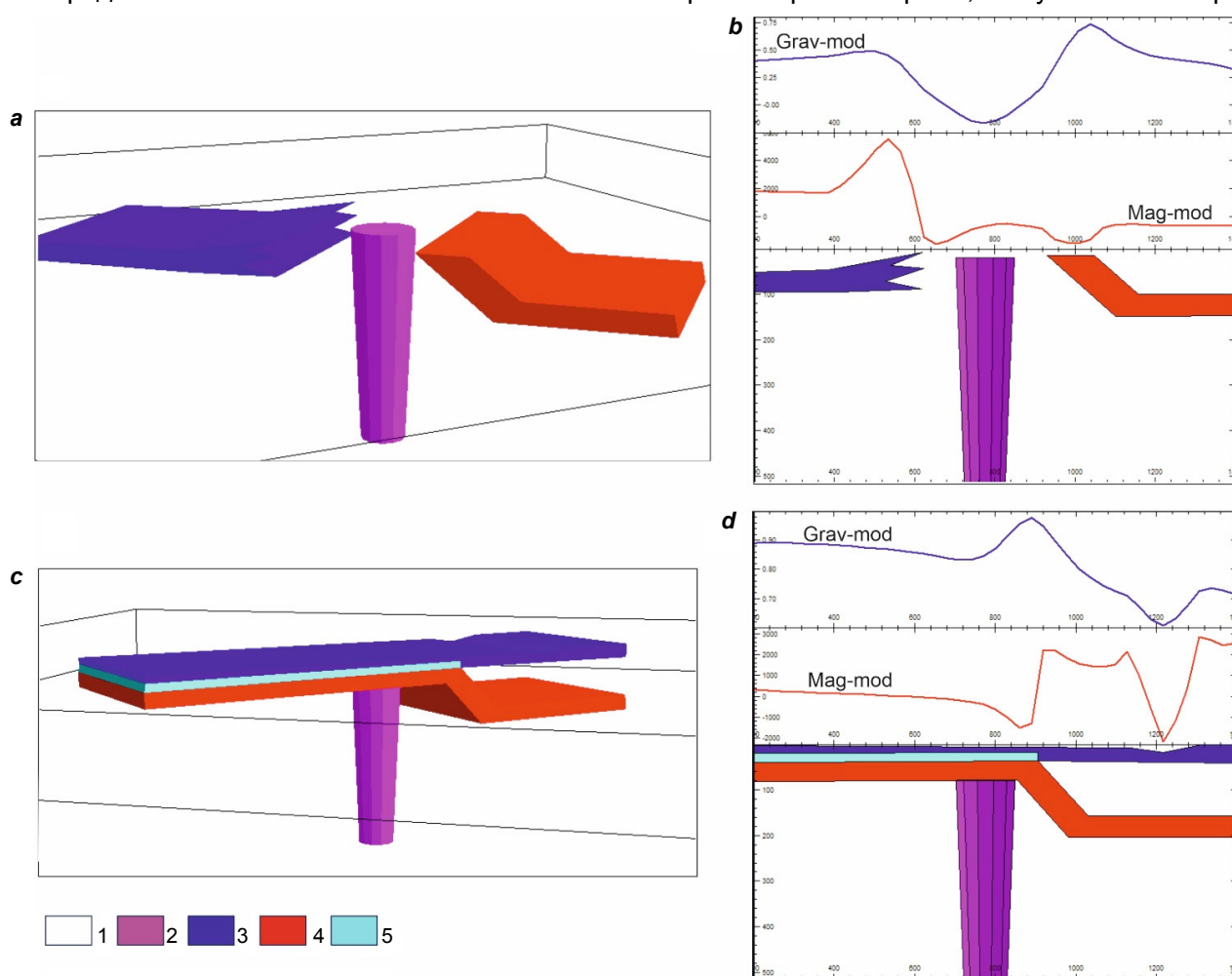


Рис. 11. Физико-геологические 3D-модели поведения траппов вблизи кимберлитовых трубок:

а, с – перспектива; b, d – разрезы

1 – вмещающие породы; 2 – кимберлиты; 3 – долериты второй фазы;

4 – долериты третьей фазы; 5 – петромагнитные неоднородности второго типа (обжига)

Для расчета гравимагнитного эффекта использовались значения из таблицы

Fig. 11. Physico-geological 3D models of trap behavior near kimberlite pipes:

a, c – perspective; b, d – sections

1 – host rocks; 2 – kimberlites; 3 – second phase dolerites;

4 – third phase dolerites; 5 – petromagnetic heterogeneities of the second type (burning)

Gravimagnetic effect was calculated on the basis of the table values



Значения петрофизических параметров, принятых для построения петрофизических моделей на рис. 11

Values of petrophysical parameters adopted for petrophysical modeling in Fig. 11

Номер условного обозначения	Тип пород	σ , кг/м ³	α , 10 ⁻⁵ СИ	ln , 10 ⁻³ А/м	D , град.	J , град.	Q , ед.
1	Вмещающие породы	2670	Практически не магнитные				
2	Кимберлиты	2550	100	40	350	70	0,6
3	Долериты второй фазы	2950	1000	2500	50	70	4
4	Долериты третьей фазы	3000	1200	920	270	-70	1,5
5	Петромагнитные неоднородности второго типа (обжига)	2950	1000	500	300	-10	0,8

собой препятствие, стал огибать кимберлитовую трубку. В результате он подошел к подошве силла второй фазы и полностью ее перемагнитил. В результате над трубкой мы наблюдаем положительную гравитационную и резкую отрицательную магнитную аномалии (см. рис. 11, с, d). Первая обусловлена подъемом с нижнего горизонта плотных образований (долериты, ≈ 3000 кг/м³). С учетом того, что долериты третьей фазы отрицательно намагничены, то они сформировали петромагнитные неоднородности второго типа (обжига) в вышележающих горных породах (долериты и туфы ранней фазы). Это способствовало образованию контрастной отрицательной магнитной аномалии над трубкой. Отрицательная магнитная аномалия может быть связана и с уменьшением мощности силла долеритов (речная долина, линзы туфов). Но в данном случае будет наблюдаться не повышенная, а пониженная гравитационная аномалия.

Необходимо отметить, что амплитуда, характер и размер магнитных аномалий (см. рис. 11, b, d) допускают эффективное обнаружение и картирование перспективных обстановок с помощью детальной магнитной съемки, которую, учитывая современный уровень магниторазведки, наиболее целесообразно проводить в варианте с применением беспилотного летательного аппарата (БПЛА) в наиболее крупных масштабах – 1:500–1:2000 [28, 29]. К сожалению, на данный момент мы не располагаем аналогичными по производительности технологиями БПЛА-гравиразведки, обеспечивающими необходимую чувствительность, но можно надеяться, что в перспективе ближайших лет станет возможным проводить

и комплексные БПЛА-гравимагнитные съемки, которые позволят решать задачу поисков с максимальной достоверностью.

Заключение

Петро- и палеомагнитные исследования ориентированных образцов раннепалеозойских пород карбонатного цоколя, отобранных в зоне динамического влияния кимберлитовой трубки, показали следующее:

1. При формировании кимберлитовых диатрем в кимберлитовмещающей среде возникают поля термоупругих напряжений, характеризующиеся эпигенетическими изменениями и связанными с ними петрофизическими неоднородностями или аномалиями обжига и/или стресса.

2. Петромагнитные неоднородности или аномалии в кимберлитовмещающих породах будут отражаться в изменении характера АМВ (от осадочного до даечного геотипа) и наличием векторов метакронной ЕОН.

3. Размеры петромагнитных неоднородностей или аномалий в плане могут значительно превышать размеры собственно кимберлитовой трубки, что способствует выделению и оконтуриванию наиболее перспективных участков при поисковом бурении.

4. Благодаря магнитоупругому эффекту вблизи кимберлитовых тел образуются зоны, труднопроницаемые для базитовых магм. Это объясняет их выклинивание вдоль петрофизических барьеров: расщепление на маломощные «языки», образование безтрапповых «окон» и «коридоров», торообразных валов с резко возрастающей в интрузивах мощностью и т. п. Обладая относительно повышенными зна-



чениями магнитных и плотностных параметров, такие магматические образования будут отражаться в наблюдаемых геофизических полях характерными аномалиями структурного типа.

5. Наиболее оптимальным способом для поисков таких аномалий с учетом полученных результатов моделирования следует считать

БПЛА-магниторазведку наиболее крупных масштабов.

Таким образом, петромагнитные неоднородности или аномалии целесообразно рассматривать в качестве важного петрофизического поискового критерия обнаружения коренных кимберлитовых тел.

Список источников

1. Иванов Д.В., Толстов А.В., Иванов В.В. Геохимические поиски месторождений алмазов в пределах Алакит-Мархинского кимберлитового поля // Вопросы естествознания. 2018. № 2. С. 44–48. EDN: XZLDML.
2. Игнатов П.А., Новиков К.В., Шмонов А.М., Разумов А.Н., Килижиков О.К. Сравнительный анализ рудовмещающих структур Майского, Мархинского и Озерного кимберлитовых тел Накынского поля Якутии // Геология рудных месторождений. 2015. Т. 57. № 2. С. 125–131. <https://doi.org/10.21285/10.7868/S0016777015020033>. EDN: TPWJWR.
3. Игнатов П.А. Методы обнаружения скрытых рудоконтролирующих структур в осадочных толщах на примерах месторождений урана и алмазов // Фундаментальные проблемы геологии месторождений полезных ископаемых и металлогении: материалы XXI Междунар. науч. конф., посвящ. 100-летию акад. В.И. Смирнова. М.: МАКС Пресс, 2010. В 2 т. Т. 1. С. 169–186.
4. Костровицкий С.И. Физические условия, гидравлика и кинематика заполнения кимберлитовых трубок / отв. ред. М.М. Одинцов. Новосибирск: Наука, 1976. 96 с.
5. Милашев В.А. Трубки взрыва. Л.: Недра, 1984. 268 с.
6. Некрасов И.Я., Горбачёв Н.С. О возможном механизме образования кимберлитов // Доклады Академии наук СССР. 1978. Т. 240. № 1. С. 181–184.
7. Никишов К.Н. Петролого-минералогическая модель кимберлитового процесса / отв. ред. В.В. Ковальский. М.: Наука, 1984. 213 с.
8. Константинов К.М., Мишенин С.Г., Томшин М.Д., Корнилова В.П., Ковальчук О.Е. Петромагнитные неоднородности пермо-триасовых траппов Далдыно-Алакитского алмазоносного района (Западная Якутия) // Литосфера. 2014. № 2. С. 77–98. EDN: SGPOVZ.
9. Константинов К.М., Киргуев А.А., Хороших М.С. Петромагнитные неоднородности стресса: прикладное следствие Виллари-эффекта // Природные ресурсы Арктики и Субарктики. 2018. Т. 24. № 2. С. 29–38. <https://doi.org/10.31242/2618-9712-2018-24-2-29-38>. EDN: UZSKPQ.
10. Константинов И.К., Константинов К.М., Хороших М.С., Киргуев А.А., Орлова Г.В. Анизотропия магнитной восприимчивости петромагнитных неоднородностей зон обжига и стресса осадочных и магматических горных пород // Геофизика. 2023. № 4. С. 41–49. <https://doi.org/10.34926/geo.2023.75.92.007>. EDN: LCABXV.
11. Вахромеев Г.С., Давыденко А.Ю. Моделирование в разведочной геофизике. М.: Недра, 1987. 193 с.
12. Зинчук Н.Н., Бондаренко А.Т., Гарат М.Н. Петрофизика кимберлитов и вмещающих пород. М.: Изд-во ООО «Недра-Бизнесцентр», 2002. 695 с.
13. Храмов А.Н., Гончаров Г.И., Комиссарова Р.А., Писаревский С.А., Погарская И.А., Ржевский Ю.С. [и др.]. Палеомагнитология / под ред. А.Н. Храмова. Л.: Недра, 1982. 312 с.
14. Шолпо Л.Е. Использование магнетизма горных пород для решения геологических задач. Л.: Недра, 1977. 183 с.
15. Jelínek V. Measuring anisotropy of magnetic susceptibility on a slowly spinning specimen – basic theory // Agico Print no. 10. Brno, 1997. P. 1–27.
16. Tarling D.H., Hrouda F. The magnetic anisotropy of rocks. London: Chapman & Hall, 1993. 217 p.
17. Zijderveld J.D.A. A.C. demagnetization of rocks: analysis of results // Methods in paleomagnetism / eds D.W. Collinson, K.M. Creer, S.K. Runcorn. Vol. 3. Amsterdam: Elsevier, 1967. P. 254–286.
18. Константинов К.М., Яковлев А.А., Антонова Т.А., Константинов И.К., Ибрагимов Ш.З., Артемова 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.
19. 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.
20. Зинчук Н.Н. Об основных геологопоисковых обстановках при прогнозировании кимберлитовых трубок // Наука



и образование. 2016. № 4. С. 7–15. EDN: XYFZCP.

21. Крючков Л.И., Никулин В.И., Красинец С.С., Лелюх М.И., Любименко В.Ф., Сомов С.В. [и др.]. Условия локализации и особенности строения кимберлитового тела в Айхальском районе // Геология и геофизика. 1991. № 5. С. 61–69.

22. Томшин М.Д., Гоголева С.С. Морфология трапповых силлов вблизи кимберлитов // Литосфера. 2023. Т. 23. № 4. С. 579–588. <https://doi.org/10.24930/1681-9004-2023-23-4-579-588>. EDN: VZFUFH.

23. Томшин М.Д., Лелюх М.И., Мишенин С.Г., Сунцова С.П., Копылова А.Г., Убинин С.Г. Схема развития траппового магматизма восточного борта Тунгусской синеклизы // Отечественная геология. 2001. № 5. С. 19–24.

24. Киргуев А.А., Константинов К.М., Васильева А.Е. Петромагнитная легенда базитов восточного борта Тунгусской синеклизы // Природные ресурсы Арктики и Субарктики. 2019. Т. 24. № 1. С. 18–32. <https://doi.org/10.31242/2618-9712-2019-24-1-18-32>. EDN: XPEQYO.

25. Киргуев А.А., Константинов К.М., Кузина Д.М., Макаров А.А., Васильева А.Е. Петромагнитная классификация базитов восточного борта Тунгусской синеклизы // Геофизика. 2020. № 3. С. 45–61. EDN: FQKOIB.

26. Константинов К.М., Гладков А.С. Динамическая физико-геологическая модель месторождения алмазов кимберлитовой трубки Комсомольская (Алакит-Мархинское поле Западной Якутии) // Геодинамика и тектонофизика. 2022. Т. 13. № 5. С. 0678. <https://doi.org/10.5800/GT-2022-13-5-0678>. EDN: IDAGIA.

27. Константинов К.М., Новопашин А.В., Евстратов А.А., Константинов И.К. Физико-геологическое моделирование гравимагнитных полей коренных месторождений алмазов в условиях развития пермотриасовых траппов // Геофизика. 2012. № 6. С. 64–72. EDN: RZDIMT.

28. Паршин А.В., Будяк А.Е., Блинов А.В., Костерев А.Н., Морозов В.А., Михалев А.О. [и др.]. Низковысотная беспилотная аэромагниторазведка в решении задач крупномасштабного структурно-геологического картирования и поисков рудных месторождений в сложных ландшафтных условиях. Часть 2 // География и природные ресурсы. 2016. № S6. С. 150–155. [https://doi.org/10.21782/GIPR0206-1619-2016-6\(150-155\)](https://doi.org/10.21782/GIPR0206-1619-2016-6(150-155)). EDN: XQRZBR.

29. Parshin A.V., Morozov V.A., Blinov A.V., Kosterev A.N., Budyak A.E. Low-altitude geophysical magnetic prospecting based on multirotor UAV as a promising replacement for traditional ground survey // Geo-Spatial Information Science. 2018. Vol. 21. Iss. 1. P. 67–74. <https://doi.org/10.1080/10095020.2017.1420508>. EDN: XXHXRZ.

References

1. Ivanov D.V., Tolstov A.V., Ivanov V.V. Geochemical prospecting of diamond deposits within the Alakit-Markha kimberlite field bounds. *Voprosy estestvoznaniya*. 2018;2:44–48. (In Russ.). EDN: XZLDML.

2. Ignatov P.A., Novikov K.V., Shmonov A.M., Razumov A.N., Kilizhekov O.K. Comparative analysis of ore-bearing structures in Maiskoe, Markha, and Ozernoe kimberlite bodies at the Nakyn field, Yakutia. *Geologiya rudnykh mestorozhdenii*. 2015;57(2):125–131. (In Russ.). <https://doi.org/10.21285/10.7868/S0016777015020033>. EDN: TPWJWR.

3. Ignatov P.A. Detection methods of hidden ore-controlling structures in sedimentary strata on the examples of uranium and diamond deposits. In: *Fundamental'nye problemy geologii mestorozhdenii poleznykh iskopaemykh i metallogenii: materialy XXI Mezhdunar. nauch. konf., posvyashch. 100-letiyu akad. V.I. Smirnova = Fundamental problems of geology of mineral deposits and metallogeny: proceedings of the 21st International scientific conference, dedicated to the 100th anniversary of Academician V.I. Smirnov*. Moscow: MAKSPress; 2010, vol. 1, p. 169–186. (In Russ.).

4. Kostrovitskii S.I. *Physical conditions, hydraulics and kinematics of kimberlite pipes filling*. Novosibirsk: Nauka; 1976, 96 p. (In Russ.).

5. Milashev V.A. *Explosion tubes*. Leningrad: Nedra; 1984, 268 p. (In Russ.).

6. Nekrasov I.Ya., Gorbachev N.S. Possible kimberlite formation mechanism. *Doklady Akademii nauk SSSR*. 1978;240(1):181–184. (In Russ.).

7. Nikishov K.N. *Petrological and mineralogical model of the kimberlite process*. Moscow: Nauka; 1984, 213 p. (In Russ.).

8. Konstantinov K.M., Mishenin S.G., Tomshin M.D., Kornilova V.P., Kovalchuk O.E. Petro-magnetic heterogeneities of the Permo-Triassic traps of the Daldyn-Alakit diamond province (Western Yakutia). *Litosfera = Lithosphere (Russia)*. 2014;2:77–98. (In Russ.). EDN: SGPOVZ.

9. Konstantinov K.M., Kirguyev A.A., Khoroshikh M.S. Petro-magnetic heterogeneities of stress: applied corollary of Vilari effect. *Prirodnye resursy Arktiki i Subarktiki = Arctic and Subarctic Natural Resources*. 2018;24(2):29–38. (In Russ.). <https://doi.org/10.31242/2618-9712-2018-24-2-29-38>. EDN: UZSKPQ.

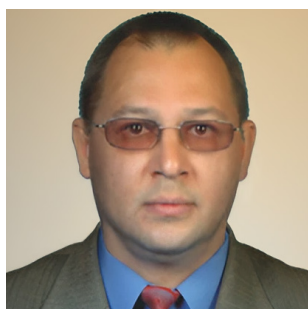
10. Konstantinov I.K., Konstantinov K.M., Khoroshikh M.S., Kirguyev A.A., Orlova G.V. Anisotropy of the magnetic susceptibility petromagnetic heterogeneities of firing and stress zones of sedimentary and igneous rocks. *Geofizika = Geophysics*. 2023;4:41–49. (In Russ.). <https://doi.org/10.34926/geo.2023.75.92.007>. EDN: LCABXV.

11. Vakhromeev G.S., Davydenko A.Yu. *Modeling in exploration geophysics*. Moscow: Nedra; 1987, 193 p. (In Russ.).



12. Zinchouk N.N., Bondarenko A.T., Garat M.N. *Petrophysics of kimberlites and their host rocks*. Moscow: Nedra-Biznes-sentr; 2002, 695 p. (In Russ.).
13. 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.).
14. Sholpo L.E. *Using rock magnetism for solving geologic problems*. Leningrad: Nedra; 1977, 183 p. (In Russ.).
15. Jelínek V. Measuring anisotropy of magnetic susceptibility on a slowly spinning specimen – basic theory. *Agico Print no. 10*. Brno; 1997, p. 1-27.
16. Tarling D.H., Hrouda F. *The magnetic anisotropy of rocks*. London: Chapman & Hall; 1993, 217 p.
17. Zijderveld J.D.A. A.C. demagnetization of rocks: analysis of results. In: Collinson D.W., Creer K.M., Runcorn S.K. (eds). *Methods in paleomagnetism*. Amsterdam: Elsevier; 1967, vol. 3, p. 254-286.
18. Konstantinov K.M., Yakovlev A.A., Antonova T.A., Konstantinov I.K., Ibragimov Sh.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.
19. 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.
20. Zinchuk N.N. Geological structure and petrography of kimberlite pipes. *Nauka i obrazovanie*. 2016;4:7-15. (In Russ.). EDN: XYFZCP.
21. Kryuchkov L.I., Nikulin V.I., Krasinets S.S., Lelyukh M.I., Lyubimenko V.F., Somov S.V., et al. Localization conditions and structure features of the kimberlite body in the Aikhal area. *Geologiya i geofizika*. 1991;5:61-69. (In Russ.).
22. Tomshin M.D., Gogoleva S.S. Morphology of trap sills near kimberlites. *Litosfera = Lithosphere (Russia)*. 2023;23(4):579-588. (In Russ.). <https://doi.org/10.24930/1681-9004-2023-23-4-579-588>. EDN: VZFUFH.
23. Tomshin M.D., Lelyukh M.I., Mishenin S.G., Suntsova S.P., Kopylova A.G., Ubinin S.G. Development scheme of trap magmatism of the eastern side of the Tunguska syncline. *Otechestvennaya Geologiya = National Geology*. 2001;5:19-24. (In Russ.).
24. Kirguez A.A., Konstantinov K.M., Vasilyeva A.E. Basite petromagnetic legend of the Tungus syncline eastern board. *Prirodnye resursy Arktiki i Subarkтики = Arctic and Subarctic Natural Resources*. 2019;24(1):18-32. (In Russ.). <https://doi.org/10.31242/2618-9712-2019-24-1-18-32>. EDN: XPEQYO.
25. Kirguez A.A., Konstantinov K.M., Kuzina D.M., Makarov A.A., Vasilyeva A.E. Petromagnetic classification of mafic rocks on the eastern side of the Tunguska syncline. *Geofizika = Geophysics*. 2020;3:45-61. (In Russ.). EDN: FQKOIB.
26. Konstantinov K.M., Gladkov A.S. Dynamic physical-geological model of the field of diamonds from the Komsomolskaya kimberlite pipe (Alakit-Markha field of Western Yakutia). *Geodinamika i tektonofizika = Geodynamics & Tectonophysics*. 2022;13(5):0678. (In Russ.). <https://doi.org/10.5800/GT-2022-13-5-0678>. EDN: IDAGIA.
27. Konstantinov K.M., Novopashin A.V., Evstratov A.A., Konstantinov I.K. Modeling of gravimagnetic fields of primary diamond deposits in areas of Permian-Triassic traps. *Geofizika = Geophysics*. 2012;6:64-72. (In Russ.). EDN: RZDINT.
28. Parshin A.V., Bydyak A.E., Blinov A.V., Kosterev A.N., Morozov V.A., Mikhalev A.O., et al. Low-altitude unmanned aeromagnetic survey in management of large-scale structural-geological mapping and prospecting for ore deposits in composite topography. Part 2. *Geografiya i prirodnye resursy*. 2016;S6:150-155. (In Russ.). [https://doi.org/10.21782/GIPR0206-1619-2016-6\(150-155\)](https://doi.org/10.21782/GIPR0206-1619-2016-6(150-155)). EDN: XQRZBR.
29. Parshin A.V., Morozov V.A., Blinov A.V., Kosterev A.N., Budyak A.E. Low-altitude geophysical magnetic prospecting based on multirotor UAV as a promising replacement for traditional ground survey. *Geo-Spatial Information Science*. 2018;21(1):67-74. <https://doi.org/10.1080/10095020.2017.1420508>. EDN: XXHXRZ.

Информация об авторах / Information about the authors



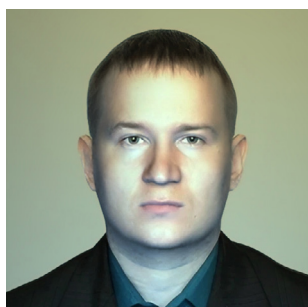
Константинов Константин Михайлович,
доктор геолого-минералогических наук,
руководитель департамента геофизики,
институт «Сибирская школа геонаук»,
Иркутский национальный исследовательский технический университет,
г. Иркутск, Россия,
старший научный сотрудник лаборатории геологии месторождений,
Институт 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>



Томшин Михаил Дмитриевич,
кандидат геолого-минералогических наук,
старший научный сотрудник, заведующий
лабораторией «Геологический музей»,
Институт геологии алмаза и благородных металлов СО РАН,
г. Якутск, Россия,
tmd@diamond.ysn.ru
<https://orcid.org/0000-0001-5865-7521>
Mikhail D. Tomshin,
Cand. Sci. (Geol. & Mineral.),
Senior Researcher, Head
of the Geological Museum Laboratory,
Diamond and Precious Metal Geology Institute SB RAS,
Yakutsk, Russia,
tmd@diamond.ysn.ru
<https://orcid.org/0000-0001-5865-7521>



Хороших Максим Сергеевич,
аспирант,
Институт земной коры СО РАН,
г. Иркутск, Россия,
khoroshix1991@mail.ru
<https://orcid.org/0000-0002-0688-2249>
Maksim S. Khoroshikh,
Postgraduate Student,
Institute of the Earth's Crust SB RAS,
Irkutsk, Russia,
khoroshix1991@mail.ru
<https://orcid.org/0000-0002-0688-2249>

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 12.09.2023; одобрена после рецензирования 04.10.2023; принята к публикации 20.11.2023.

The article was submitted 12.09.2023; approved after reviewing 04.10.2023; accepted for publication 20.11.2023.



ГЕОФИЗИКА

Научная статья

УДК 550.3

EDN: TEZSJR

DOI: 10.21285/2686-9993-2023-46-4-364-373

**Результаты аэромагниторазведки с использованием беспилотного воздушного судна на Ромашкинском месторождении углеводородов****Б.М. Насыртдинов^{a✉}, А.В. Старовойтов^b, М.М. Хамиев^c**^{a-c} Казанский (Приволжский) федеральный университет, г. Казань, Россия

Резюме. Целью представленного исследования являлось проведение на Ромашкинском нефтяном месторождении (Республика Татарстан, Россия) съемки индукции магнитного поля с применением беспилотного воздушного судна по профилю длиной 68 км 320 м. В качестве беспилотного летательного аппарата использовался электрический гексокоптер DJI Matric 600Pro. Схема проведения съемки заключалась в следующем: маршрут во время полета состоял из трех параллельных залетов (основных профилей) и одного пересекающего залета (перпендикулярный профиль). Расстояние между соседними параллельными залетами составляло 100 м. Пересекающий профиль был необходим для проведения увязки основных профилей относительно друг друга. Каждый полевой день полетные задания строились таким образом, чтобы профили перекрывались с соседними вылетами величиной не менее 100 м и траектория движения совпадала с предыдущим вылетом. Для оптимизации процесса для двух соседних вылетов выбиралась одна точка взлета/посадки. Максимум за одну съемку в течение 20–25 мин беспилотное воздушное судно с магнитометром покрывало профиль величиной, равной 1,25 км. Максимальная величина полета (от момента взлета до момента посадки) не превышала 6–6,5 пог. км. Рассмотренная в работе методика позволила покрывать 45 пог. км на протяженном участке даже в сложных погодных условиях (дождь и порывы ветра 8–12 м/с). Итоговая среднеквадратичная погрешность данной съемки составила $\pm 4,7$ нТл. В результате проведенной съемки было получено три профиля со значением индукции магнитного поля на протяженном участке. В итоге наблюдалась хорошая корреляционная зависимость между аэромагнитной съемкой с данными блокового строения фундамента (по данным геоморфологического анализа) с локальной компонентой кристаллического фундамента. Алтунино-Шунаковский разлом уверенно проявился в магнитном поле в виде положительной аномалии с амплитудой ≈ 60 нТл.

Ключевые слова: беспилотный летательный аппарат, аэромагниторазведка, геофизика

Для цитирования: Насыртдинов Б.М., Старовойтов А.В., Хамиев М.М. Результаты аэромагниторазведки с использованием беспилотного воздушного судна на Ромашкинском месторождении углеводородов // Науки о Земле и недропользование. 2023. Т. 46. № 4. С. 364–373. <https://doi.org/10.21285/2686-9993-2023-46-4-364-373>. EDN: TEZSJR.

GEOPHYSICS

Original article

Unmanned aerial vehicle aeromagnetic survey results on Romashkinskoye hydrocarbon field**Bulat M. Nasyrtdinov^{a✉}, Alexander V. Starovoytov^b, Marsel M. Khamiev^c**^{a-c} Kazan (Volga Region) Federal University, Kazan, Russia

Abstract. The purpose of the study is to survey the magnetic field induction on the Romashkinskoye oil field (Republic of Tatarstan, Russia) using an unmanned aerial vehicle over the profile of 68 km 320 m. A DJI Matric 600Pro electric hexacopter was used as an unmanned aerial vehicle. The survey scheme was as follows: the mission route consisted of three parallel flights (main profiles) and one crossing flight (transverse profile). The distance between adjacent parallel flights was 100 m. The intersecting profile was necessary to connect the main profiles. The flight assignments of each field day

© Насыртдинов Б.М., Старовойтов А.В., Хамиев М.М., 2023



were built to overlap the profiles by at least 100 m by the nearby flights and make the flight trajectory coincide with the one of the previous flight. To optimize the process one takeoff / landing point was selected for two nearby flights. During one 20-25 min survey the maximum profile covered by the unmanned aerial vehicle was 1.25 km. The maximum flight distance (from the takeoff moment to the landing) did not exceed 6–6.5 linear kilometers. The methodology considered in the article made it possible to cover 45 linear kilometers over a long span even in adverse weather conditions (rain and wind gusts of 8–12 m/s). The resulting root mean square error for this survey was ± 4.7 nT. The survey conducted allowed to obtain 3 profiles with the magnetic field induction magnitude over an extended section. A good correlation was registered between the aeromagnetic survey and the data on the block structure of the basement (according to geomorphological analysis data) with the local component of the crystalline basement. Altunino-Shunak fault has clearly manifested itself in the magnetic field as a positive anomaly with an amplitude of ≈ 60 nT.

Keywords: unmanned aerial vehicle, aeromagnetometry, geophysics

For citation: Nasyrtidinov B.M., Starovoytov A.V., Khamiev M.M. Unmanned aerial vehicle aeromagnetic survey results on Romashkinskoye hydrocarbon field. *Nauki o Zemle i nedropol'zovanie = Earth sciences and subsoil use*. 2023;46(4):364-373. (In Russ.). <https://doi.org/10.21285/2686-9993-2023-46-4-364-373>. EDN: TEZSJ.R.

Введение

На сегодняшний день активная разработка беспилотных летательных аппаратов (БПЛА) ведет к их повсеместному применению в различных областях. Магниторазведочные работы не стали исключением. Так, для проведения аэромагнитных исследований начали применяться БПЛА в различных модификациях¹. Данный тип съемки в настоящее время рассматривается в качестве разновидности аэромагнитной съемки², что позволяет решать не только задачи классической аэромагниторазведки (выделение рудных залежей, исследование нефтегазовых структур и т. п.), но и проблемы, связанные с инженерной геологией и археологией³.

Большая часть подобных работ посвящена аэромагниторазведочным работам масштаба 1:1000–1:10000 [1–20], на основании которых в 2018 году были выпущены «Методические рекомендации по выполнению маловысотной аэромагнитной съемки»⁴, а в 2020 году «Методические рекомендации по проведению комплексных аэрогеофизических съемок»⁵.

Целью представленного исследования являлось проведение аэромагнитной съемки с беспилотным воздушным судном (БВС) на протяженном участке (68,32 км). Для решения поставленной задачи использовалась следующая аппаратура (рис. 1):

– БВС гексокоптер DJI Matrice 600 Pro;

– аэромагнитометр оверхаузеровский POS-1 Аеро.

В качестве объекта исследования был выбран участок, представляющий интерес в геологическом и геодинамическом отношении, в районе расположения месторождений углеводородов. Общая длина протяженного участка составляла 68 км 320 м (см. рис. 1). Съемка проводилась в период с 3 по 8 октября 2022 года.

Материалы и методы исследования

Крепление магнитометра к БВС осуществлялось с помощью немагнитного троса длиной 16 м. Длина была определена авторами опытно-методическим путем в 2020 году, когда проводилась оценка влияния различных типов БВС на оверхаузеровский магнитометр MMPOS-1, а также возможности использования данного типа магнитометра с различными БВС [21]. Магнитометр выполнен в виде гондолы с расположением на нем датчика Глобальной навигационной спутниковой системы для определения текущих координат самой гондолы.

Основной проблемой служила невозможность покрытия всего профиля за один вылет, так как у БВС есть ограничение на нахождении в воздухе, которое составляет 30–40 минут в зависимости от температуры

¹ William F. Hanna geologic applications of modern aeromagnetic surveys // Proceedings of the U.S. Geological Survey workshop on geological applications of modern aeromagnetic surveys. Lakewood, 6–8 January 1987. Lakewood, 1987.

² Molyneaux B.L. Report on an aeromagnetic survey of the Missouri national recreational river data acquisition, geophysical processing, and base map interpretation. Omaha: Archaeology Laboratory, 2002. 48 p.

³ Инструкция по магниторазведке (наземная магнитная съемка, аэромагнитная съемка, гидромагнитная съемка). Л.: Недра, 1981. 263 с.

⁴ Паршин А.В., Цирель, В.С., Ржевская А.К. Методические рекомендации по выполнению маловысотной аэромагнитной съемки. М.: Изд-во ВИМС, 2018. 37 с.

⁵ Методические рекомендации по проведению комплексных аэрогеофизических съемок / сост. Ю.В. Асламов, П.С. Бабаянц, Н.А. Глинский, Е.И. Зубов, П.В. Мельников. СПб.: Картографическая фабрика ВСЕГЕИ, 2021. 50 с.

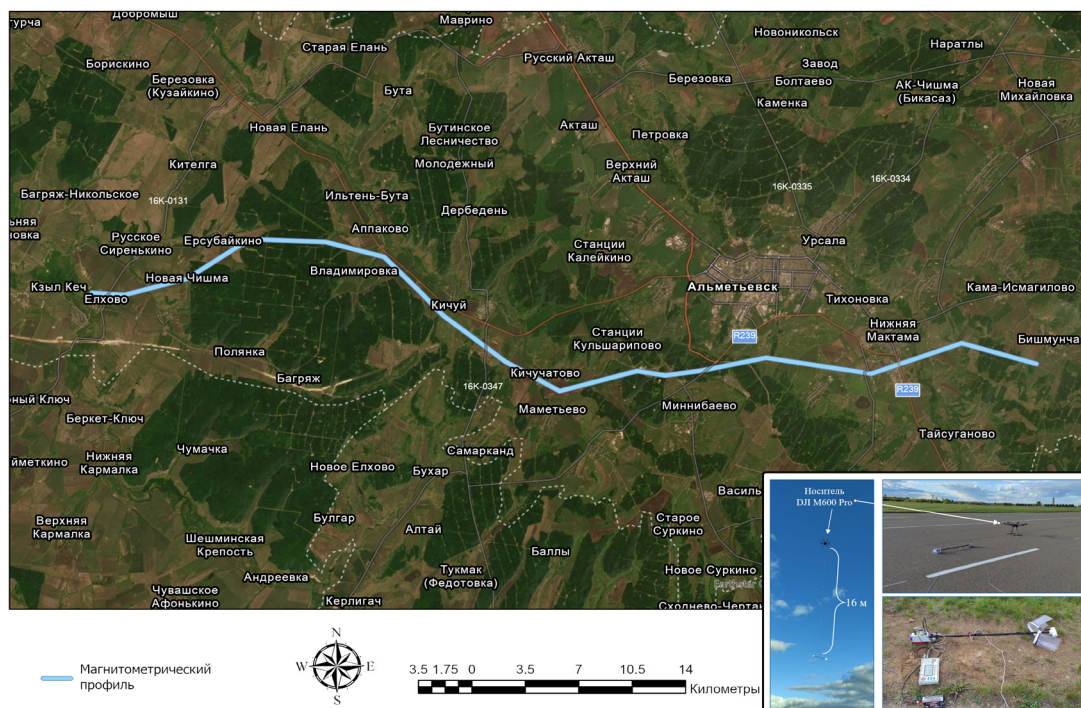


Рис. 1. Расположение магнитометрического профиля на участке исследования
Fig. 1. Magnetometric profile location on the site under investigation

окружающей среды и веса подвешенной полезной нагрузки. В ходе опытно-методических работ были выбраны следующие параметры для проведения аэромагнитных работ с БПЛА на данном участке:

- максимальная дальность полета не должна была превышать 6 км;
- время нахождения БВС с магнитометром в воздухе должно было составлять не более 20–25 минут.

Работы проводились в различных погодных условиях (слабый дождь, порывы ветра 8–12 м/с).

Для решения поставленной задачи было необходимо определить маршрутное задание, по которому БВС осуществляло бы съемку. В качестве маршрутного задания была выбрана следующая схема: полетный маршрут состоял из трех залетов (основных профилей) и одного пересекающего залета (перпендикулярный профиль). Расстояние между соседними параллельными залетами равнялось 100 м. Пересекающий профиль был необходим для проведения увязки основных профилей относительно друг друга. Каждый полевой день полетные задания строились таким образом, чтобы профили перекрывались с соседними вылетами величиной не менее 100 м и траектория движения совпадала с предыдущим полетом, также для оптимизации процесса для двух сосед-

них вылетов выбиралась одна точка взлета/посадки (рис. 2).

В итоге в течение одного рабочего дня выполнялась съемка от 4 до 6 таких точек или осуществлялось от 8 до 12 вылетов, что за один рабочий день позволяло закрывать до 15 км по профилю и 45 пог. км (если брать в расчет только три основных профиля). Итоговая суммарная протяженность за весь период съемки составляла 205 пог. км. Высота полета БПЛА равнялась 150 м. При создании маршрутных заданий для гексокоптера была выбрана возможность полета с огибанием рельефа по данным грубой цифровой модели рельефа (детальность цифровой модели рельефа составляла 90 м на 1 пиксель). Данная высота была выбрана с учетом соображений безопасного пролета всех техногенных помех и возможности удаления от них на максимальное расстояние (когда отсутствует влияние), но таким образом, чтобы сохранить возможность детальной съемки. Вследствие этого положение магнитометра составляло в среднем 134 м от поверхности земли.

Формирование полетных заданий проходило в программном пакете UgCS. Для построения данных заданий использовался алгоритм, разработанный и написанный на языке Python, который позволял располагать траекторию движения БПЛА по заданному центральному профилю.

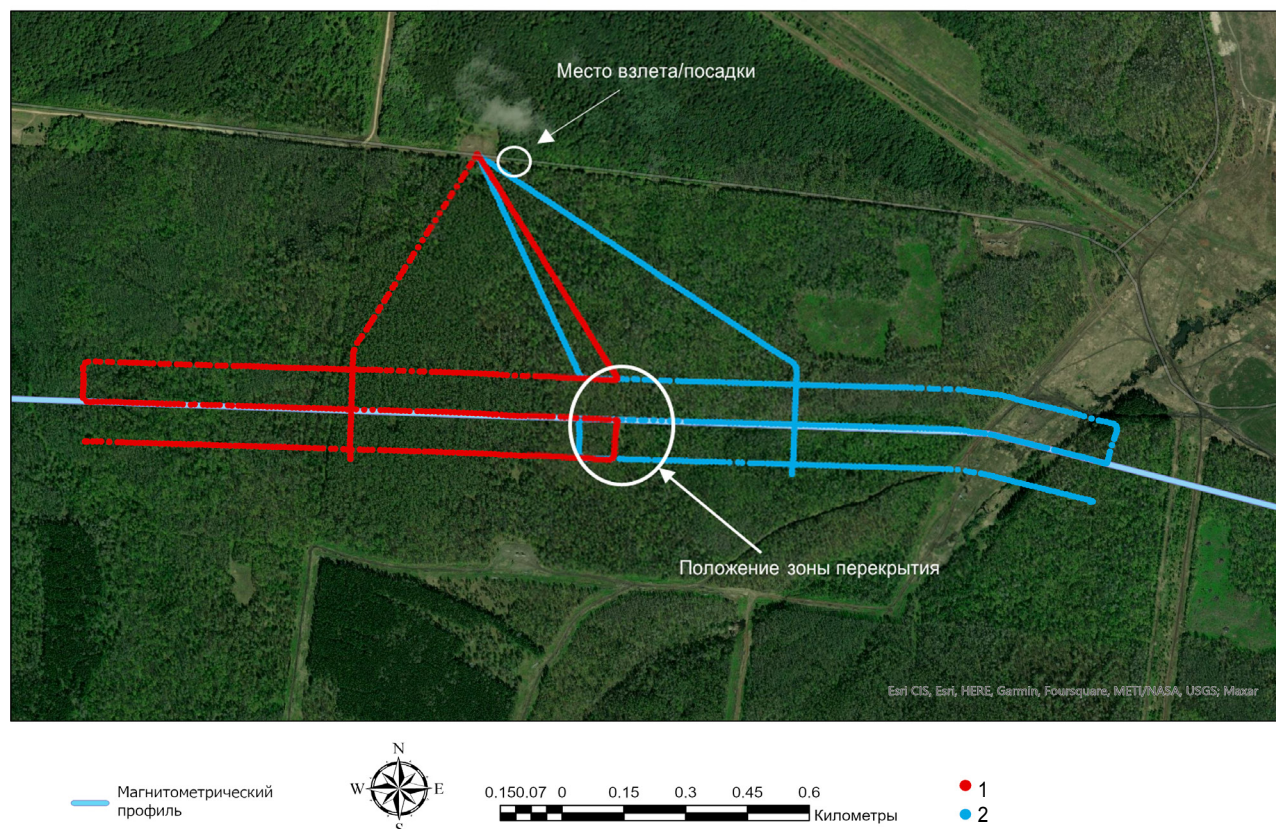


Рис. 2. Траектория двух соседних вылетов 5 октября 2022 года:

1 – четвертый вылет; 2 – пятый вылет

Fig. 2. The trajectory of two nearby flights on October 5, 2022:

1 – fourth flight; 2 – fifth flight

Так как общая длина профиля составляла 68,32 км, установка магнитовариационных станций (МВС) посередине профиля была не совсем корректной в связи с сильной удаленностью МВС от точек съемки более чем на 30 км³. В связи с этим каждый полевой день выбиралось место с минимально возможными техногенными помехами, где и устанавливались МВС. Расположение МВС от самых дальних точек съемки не превышало 8 км. Также такой подход в нашем случае позволял ускорить процесс проведения полевых работ. В качестве МВС использовался оверхаузеровский магнитометр MMPOS-1, съемка велась с интервалом в 10 с.

В результате проведения аэромагнитной съемки было выполнено 58 вылетов. Обработка материалов проводилась в два этапа:

1. Обработка каждого вылета в отдельности (ввод поправки за вариацию магнитного поля).
2. Сшивка всех вылетов и интерпретация полученной результирующей карты.

Обработка всех вылетов осуществлялась в программном пакете Geosoft Oasis montaj. Для каждого вылета была создана база данных, в которую импортировались исходные данные.

Ввод поправки за вариации магнитного поля осуществлялся с помощью стандартной функции Oasis montaj «Ввод поправки». Далее весь вылет разбивался на соответствующие профили, в результате разбивки были получены профили с нумерацией. Помимо этого, в каждом вылете проводилась проверка на аппаратные ошибки прибора (значения, являющиеся ошибкой и не связанные с геологическими особенностями территории исследования).

Как описывалось выше, все вылеты формировались таким образом, что между соседними вылетами существовало перекрытие величиной около 100 м (см. рис. 2). Были выделены участки перекрытия и произведен сравнительный анализ относительного смещения соседних вылетов. В течение дня смещения между вылетами являлись незначительными. В табл. 1 представлена величина разницы локального магнитного поля в зоне перекрытия по профилю 1 между соседними вылетами, полученная в течение одного дня – 4 октября 2022 года. На рис. 3 представлен пример сопоставления такой зоны перекрытия между первым и одиннадцатым вылетами за 5 октября 2022 года.



Таблица 1. Величины разницы локального магнитного поля в зоне перекрытия разных вылетов за 4 октября 2023 года
Table 1. Difference in the local magnetic field magnitudes in the overlap area of different flights on October 4, 2023

Номер вылета	Номер соседнего вылета	Среднее смещение в течение дня, нТл
1	2	-0,725
2	7	-0,732
3	4	1,175
4	1	0,627
5	6	0,232
6	3	0,004
7	8	0,276
8	9	0,434
9	10	0,281

Среднее смещение по вылетам в течение дня приведено в табл. 2. Значительные смещения 8 и 9 октября 2022 года были вызваны сильным градиентом магнитного поля, связанным с крупной Алтунино-Шунакский магнитной аномалией (расположенной восточнее г. Альметьевска). Отметим, что, несмотря на применение функции огибания рельефа, ис-

пользование грубой карты рельефа во время полета приводит к серьезным смещениям индукции магнитного поля. В связи с этим для учета смещений проводимая съемка выполнялась с перекрытием соседних вылетов. Среднеквадратичная погрешность всей съемки составила 4,732 нТл.

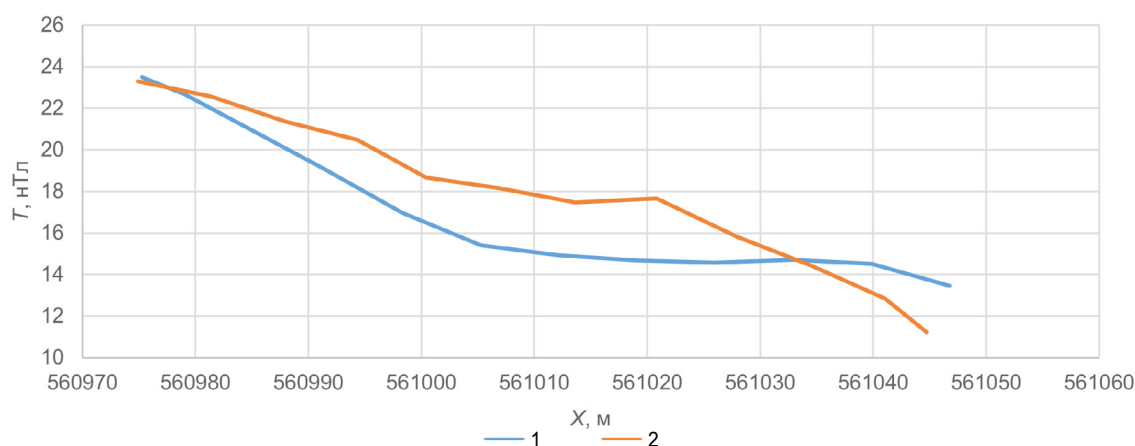


Рис. 3. Сравнение величины локального магнитного поля в зоне перекрытия разных вылетов 5 октября 2022 года:

1 – первый вылет; 2 – одиннадцатый вылет

Fig. 3. Comparison of the local magnetic field magnitude in the overlap zone of different flights on October 5, 2022:

1 – the first flight; 2 – the eleventh flight

Таблица 2. Величины разницы локального магнитного поля в зоне перекрытия по профилю между вылетами по дням
Table 2. Difference in the local magnetic field magnitudes in the overlap zone along the profile between the flights by days

Дата	Среднее смещение в течение дня, нТл
4 октября 2022 года	0,943
5 октября 2022 года	1,363
6 октября 2022 года	1,171
7 октября 2022 года	3,48
8 октября 2022 года	4,602
9 октября 2022 года	14,457



Результаты исследования и их обсуждение

В результате сшивки получена результирующая карта связанными значениями всех вылетов и построена карта локального магнитного поля длиной 68 км 320 м (рис. 4). На рис. 4 представлено распределение значения локального магнитного поля по всем профилям. На рис. 5 показано сравнение итоговых значений локального магнитного поля магнитной индукции сшитых профилей относительно друг друга.

Согласно априорной геологической информации, на территории исследования основной региональный вклад в значение индукции магнитного поля вносят магнитные горные породы, залегающие в фундаменте. Так как осадочный чехол сложен карбонатными и терригенными горными породами, их средняя намагниченность не превышает $20 \cdot 10^{-3}$ А/м [22].

Результирующая карта индукции магнитного поля совмещена в программном пакете

ArcGIS Pro с границами блоков второго порядка и локальными особенностями рельефа кристаллического фундамента (рис. 6). Согласно геологическому строению, химический состав кристаллического фундамента территории исследования представлен кислыми и основными горными породами [22]. Получившиеся магнитные аномалии хорошо коррелируются с локальной компонентой кристаллического фундамента и блоками второго порядка. Можно предположить, что основной вклад в амплитуду этих магнитных аномалий, скорее всего, вносит вещественный состав кристаллического фундамента, который значительно варьируется. Помимо вещественного состава на величину магнитной аномалии оказывает влияние рельеф кристаллического фундамента (высота кровли кристаллического фундамента). Участок Алтунино-Шунакского разлома выделяется локальной аномалией амплитудой ≈ 60 нТл, что тоже соответствует априорной информации.

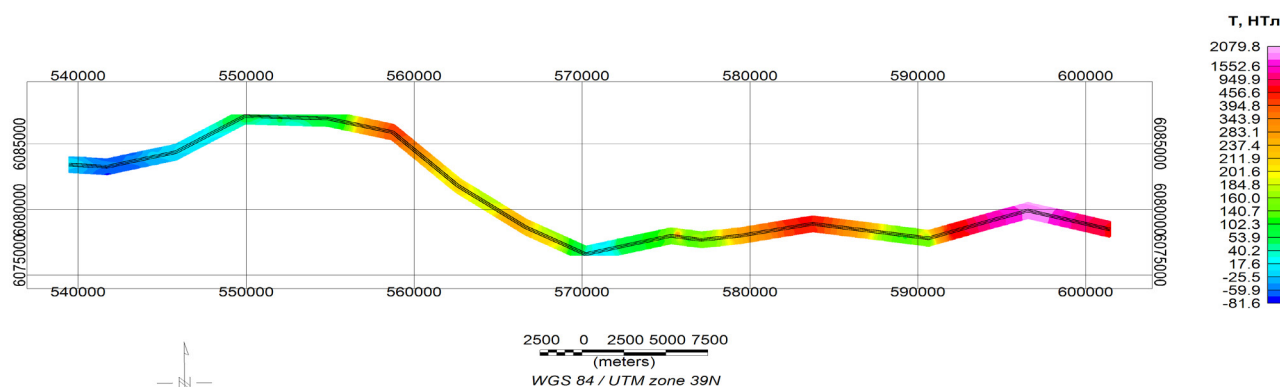


Рис. 4. Результирующая карта локального магнитного поля магнитометрического профиля
Fig. 4. Resulting map of the local magnetic field of the magnetometric profile

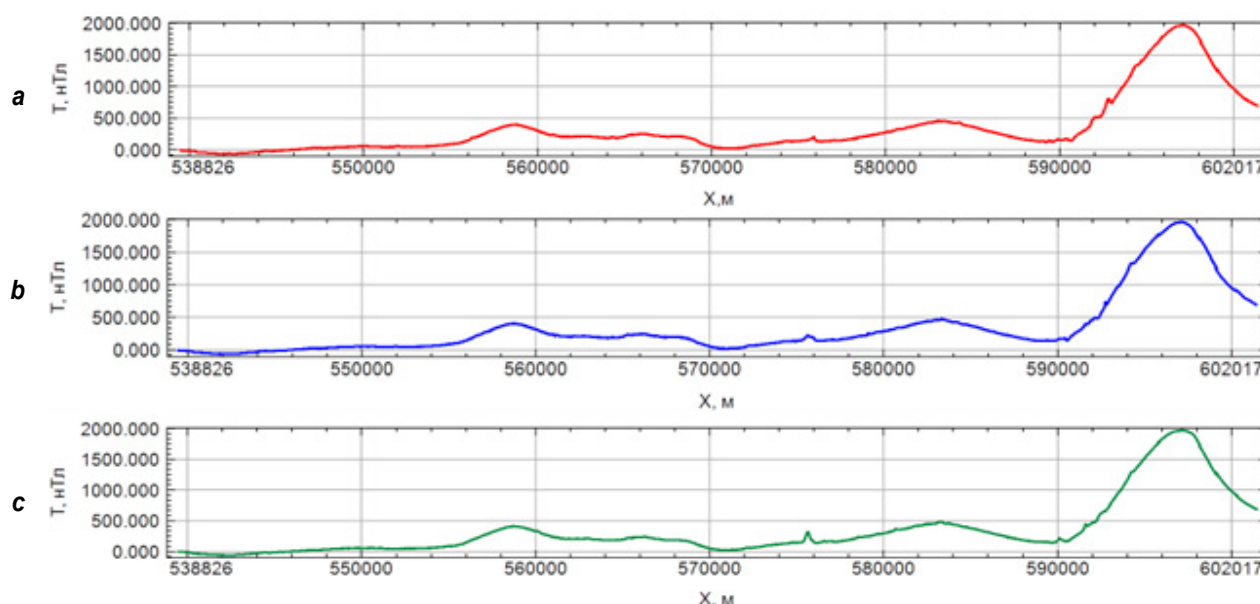


Рис. 5. Значение локального магнитного поля по профилю 1 (a), 2 (b) и 3 (c)
Fig. 5. Local magnetic field magnitudes for the profile 1 (a), 2 (b) and 3 (c)

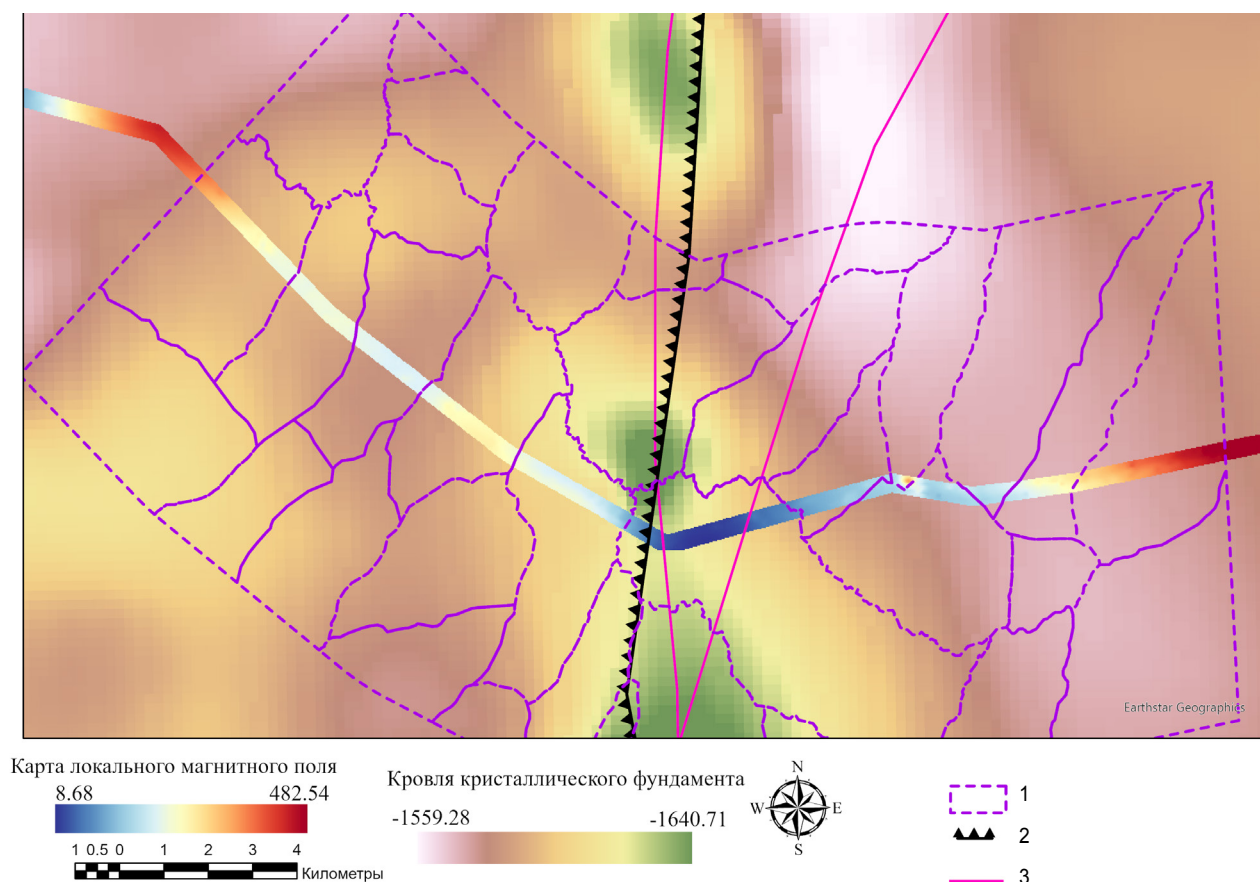


Рис. 6. Карта локального магнитного поля в сравнении с локальными особенностями рельефа кристаллического фундамента:
1 – блоки; 2 – Алтунино-Шунакский разлом; 3 – разлом в г. Альметьевске
Fig. 6. Map of the local magnetic field in comparison with the local relief features of the crystalline basement:
1 – blocks; 2 – Altunino-Shunak fault; 3 – Almetievsk fault

Закключение

В результате проведенной работы можно сделать следующие выводы:

1. Авторами осуществлена аэромагнитная съемка с БВС по профилю длиной 68 км 320 м, среднеквадратичная погрешность которой составляет 4,7 нТл.
2. Результат сопоставления априорных геологических данных с результатами аэромагнитной съемки свидетельствует о том, что подобный вид исследования позволяет выяв-

лять отдельные аномалии, связанные с вещественным составом фундамента, локальными особенностями рельефа кристаллического фундамента, а также блоковым строением фундамента.

3. Полученные результаты показывают, что в пределах исследуемой территории аэромагнитные исследования с БВС могут быть успешно использованы для решения отдельных структурных и геологических задач.

Список источников

1. Пат. № 172078, Российская Федерация, МПК В64С 39/02. Комплекс для беспилотной аэромагниторазведки / А.В. Паршин. Заявл. 19.07.2016; опубл. 28.06.2017. Бюл. № 19.
2. Bian J., Wang X., Gao S. Experimental aeromagnetic survey using a rotary-wing aircraft system: a case study in Heizhugou, Sichuan, China // Journal of Applied Geophysics. 2021. Vol. 184. P. 104245. <https://doi.org/10.1016/j.jappgeo.2020.104245>.
3. Cunningham M., Samson C., Wood A., Cook I. Aeromagnetic surveying with a rotary-wing unmanned aircraft system: a case study from a zinc deposit in Nash Creek, New Brunswick, Canada // Pure and Applied Geophysics. 2018. Vol. 175. P. 3145–3158. <https://doi.org/10.1007/s00024-017-1736-2>.
4. Lefebvre R. Introduction to UAV systems for geophysical mapping // SEG International Exposition and 87th Annual Meeting. Houston, 2017.



5. Цирел В.С., Кузнецова А.В. Аэромагнитометрия XXI века // Палеомагнитность и магнетизм горных пород: палеомагнетизм и магнетизм горных пород: теория, практика, эксперимент: материалы семинара (г. Москва, 9–12 ноября 2015 г.). Москва, 2015. С. 252–258.
6. Sakovskaya A.V., Luhmanov V.L., Demchenko N.V., Kuranov V.A. The successful use of UAV with quantum magnetometer for the mapping // *Engineering Geophysics 2017: proc. 13th conf.* Kislovodsk, 2017. P. 1–6. <https://doi.org/10.3997/2214-4609.201700373>.
7. Li H., Ge J., Dong H., Qiu X., Luo W., Liu H., et al. Aeromagnetic compensation of rotor UAV based on least squares // 37th Chinese Control conf. Wuhan, 2018. P. 10248–10253. <https://doi.org/10.23919/ChiCC.2018.8483068>.
8. Юрчук А.Ю., Сапунов В.А., Нархов Е.Д., Сергеев А.В., Васькин Н.М. Опыт составления сводных карт магнитного поля по данным наземных съемок и съемок БПЛА // Вопросы теории и практики геологической интерпретации гравитационных, магнитных и электрических полей: Материалы 49-й сессии Междунар. семинара (г. Екатеринбург, 23–27 января 2023 г.). Екатеринбург, 2023. С. 414–417. EDN: CRVKSJ.
9. Jordan B.R. Collecting field data in volcanic landscapes using small UAS (sUAS)/drones // *Journal of Volcanology and Geothermal Research*. 2019. Vol. 385. P. 231–241. <https://doi.org/10.1016/j.jvolgeores.2019.07.006>.
10. Черкасов С.В. Состояние и перспективы беспилотной аэромагниторазведки // *Науки о Земле: материалы Междунар. конф.* (г. Ташкент, 22–23 ноября 2018 г.). Ташкент, 2018. С. 156–157. EDN: DZJJBU.
11. Bell R. Comparison of ground magnetic and low altitude aeromagnetic data // SEG International Exposition and 87th Annual Meeting. Houston, 2017.
12. Наурзбаев А.М., Умирова Г.К., Verube P. Перспективы использования инновационных технологий в Казахстане при проведении аэромагниторазведки // *E-Scio*. 2020. № 5. С. 656–666. EDN: NDKQND.
13. Walter C., Braun A., Fotopoulos G. High-resolution unmanned aerial vehicle aeromagnetic surveys for mineral exploration targets // *Geophysical Prospecting*. 2020. Vol. 68. Iss. 1. P. 334–349. <https://doi.org/10.1111/1365-2478.12914>.
14. Jiang D., Zeng Z., Zhou S., Guan Y., Lin T. Integration of an aeromagnetic measurement system based on an unmanned aerial vehicle platform and its application in the exploration of the Ma'anshan magnetite deposit // *IEEE Access*. 2020. Vol. 8. P. 189576–189586. <https://doi.org/10.1109/ACCESS.2020.3031395>.
15. Li Z.-P., Gao S., Wang X.-B. New method of aeromagnetic surveys with rotorcraft UAV in particular areas // *Chinese Journal of Geophysics*. 2018. Vol. 61. Iss. 9. P. 3825–3834. <https://doi.org/10.6038/cjg2018L0588>.
16. Черкасов С.В., Стерлигов Б.В., Золотая Л.А. О возможности использования беспилотных летательных аппаратов для производства высокоточных измерений аномалий магнитного поля Земли // *Вестник Московского университета. Серия 4. Геология*. 2016. № 3. С. 17–20. <https://doi.org/10.33623/0579-9406-2016-3-17-20>. EDN: XHFHTN.
17. Семенова М.П., Цирель В.С. Перспективы развития беспилотной аэрогеофизики // *Разведка и охрана недр*. 2016. № 8. С. 34–39. EDN: WHTQJB.
18. Паршин А.В., Гребенкин Н.А., Морозов В.А., Ржевская А.К., Шикаленко Ф.Н. Первые результаты методических работ по применению беспилотных аэрогеофизических технологий на стадии поисков месторождений урана // *Разведка и охрана недр*. 2017. № 11. С. 59–64. EDN: YTHJUE.
19. Parshin A.V., Morozov V.A., Blinov A.V., Kosterev A.N., Budyak A.E. Low-altitude geophysical magnetic prospecting based on multirotor UAV as a promising replacement for traditional ground survey // *Geo-spatial Information Science*. 2018. Vol. 21. Iss. 1. P. 67–74. <https://doi.org/10.1080/10095020.2017.1420508>.
20. Malehmir A., Dynesius L., Paulusson K., Paulusson K., Johansson H., Bastani M., et al. The potential of rotary-wing UAV-based magnetic surveys for mineral exploration: a case study from central Sweden // *The Leading Edge*. 2017. Vol. 36. Iss. 7. P. 552–557. <https://doi.org/10.1190/tle36070552.1>.
21. Nasyrtidinov B., Latipov R., Khassanov D., Popov M., Usmanov A. Assessment of the impact of unmanned aerial vehicles with different engine types on the MMPOS-1 magnetometer // 20th International Multidisciplinary Scientific GeoConference SGEM 2020. Albena, 2020. P. 475–482. <https://doi.org/10.5593/sgem2020/1.2/s05.061>. EDN: QXSJQX.
22. Геология Татарстана. Стратиграфия и тектоника / гл. ред. Б.В. Буров/ отв. ред. Н.К. Есаулова, В.С. Губарева, М.: ГЕОС, 2003. 402 с.

References

1. Parshin A.V. *Complex for unmanned aeromagnetic survey*. Patent RF, no. 172078; 2016. (In Russ.). EDN: CONHQA.
2. Bian J., Wang X., Gao S. Experimental aeromagnetic survey using a rotary-wing aircraft system. A case study in Heizhugou, Sichuan, China. *Journal of Applied Geophysics*. 2021;184:104245. <https://doi.org/10.1016/j.japgeo.2020.104245>.
3. Cunningham M., Samson C., Wood A., Cook I., Doyle B. Aeromagnetic surveying with a rotary-wing unmanned aircraft system: a case study from a zinc deposit in Nash Creek, New Brunswick, Canada. *Pure and Applied Geophysics*. 2018;175:3145–



3158. <https://doi.org/10.1007/s00024-017-1736-2>.

4. Lefebvre R. Introduction to UAV systems for geophysical Mapping. In: *SEG International Exposition and 87th annual meeting*: Houston; 2017.

5. Tsirel V.S., Kuznetsova A.V. Aeromagnetometry of the 21st century. In: *Paleomagnitnost' i magnetizm gornykh porod: paleomagnetizm i magnetizm gornykh porod: teoriya, praktika, ehksperiment: Materialy seminara = Paleomagnetism and magnetism of rocks: paleomagnetism and magnetism of rocks: theory, practice, experiment: Seminar materials*. 9–12 November 2015, Moscow. Moscow; 2015, p. 252-258. (In Russ.).

6. Sakovskaya A.V., Luhmanov V.L., Demchenko N.V., Kuranov V.A. The successful use of UAV with quantum magnetometer for the mapping. In: *Engineering Geophysics 2017: proc. 13th conf.*: Kislovodsk; 2017, p. 1-6. <https://doi.org/10.3997/2214-4609.201700373>.

7. Li H., Ge J., Dong H., Qiu X., Luo W., Liu H., et al. Aeromagnetic compensation of rotor UAV based on least squares. In: *37th Chinese Control Conference*: Wuhan; 2018, p. 10248-10253. <https://doi.org/10.23919/ChiCC.2018.8483068>.

8. Yurchuk A.Yu., Sapunov V.A., Narkhov E.D., Sergeev A.V., Vas'kin N.M. Magnetic field summary map compiling experience based on ground surveys and UAV surveys. In: *Voprosy teorii i praktiki geologicheskoi interpretatsii gravitatsionnykh, magnitnykh i ehlektricheskikh polei: Materialy 49-i sessii Mezhdunar. seminara = Issues of theory and practice of geological interpretation of gravitational, magnetic and electric fields: Materials of the 49th session of the International seminar*. 23–27 January 2023, Ekaterinburg. Ekaterinburg; 2023, p. 414-417. (In Russ.). EDN: CRVKSJ.

9. Jordan B.R. Collecting field data in volcanic landscapes using small UAS (sUAS)/drones. *Journal of Volcanology and Geothermal Research*. 2019;385:231-241.

10. Cherkasov S.V. State and potential of unmanned aeromagnetic survey. In: *Nauki o Zemle: Materialy Mezhdunarodnoi konferentsii = Geosciences: Proceedings of the International Conference*. 22–23 November 2018, Tashkent. Tashkent; 2018, p. 156-157. EDN: DZJJBU.

11. Bell R. Comparison of ground magnetic and low altitude aeromagnetic data. In: *SEG International Exposition and 87th annual meeting*: Houston; 2017.

12. Naurzbaev A.M., Umirova G.K., Berube P. Prospects of innovative technologies to be used in Kazakhstan in aeromagnetic surveying. *E-Scio*. 2020;5:656-666. (In Russ.). EDN: NDKQND.

13. Walter C., Braun A., Fotopoulos G. High-resolution unmanned aerial vehicle aeromagnetic surveys for mineral exploration targets. *Geophysical Prospecting*. 2020;68(1):334-349. <https://doi.org/10.1111/1365-2478.12914>.

14. Jiang D., Zeng Z., Zhou S., Guan Y., Lin T. Integration of an aeromagnetic measurement system based on an unmanned aerial vehicle platform and its application in the exploration of the Ma'anshan magnetite deposit. *IEEE Access*. 2020;8:189576-189586. <https://doi.org/10.1109/ACCESS.2020.3031395>.

15. Li Z.-P., Gao S., Wang X.-B. New method of aeromagnetic surveys with rotorcraft UAV in particular areas. *Chinese Journal of Geophysics*. 2018;61(9):3825-3834. <https://doi.org/10.6038/cjg2018L0588>.

16. Cherkasov S.V., Sterligov B.V., Zolotaya L.A. The ability to use unmanned aerial vehicles for making high precision measurements of the anomalies of Earth's geomagnetic field. *Moscow University Bulletin. Series 4. Geology*. 2016;3:17-20. (In Russ.). <https://doi.org/10.33623/0579-9406-2016-3-17-20>. EDN: XHFHTN.

17. Semenova M.P., Tsirel V.S. Development prospects unmanned air geophysics. *Exploration and protection of the subsoil*. 2016;8:34-39. (In Russ.). EDN: WHTQJB.

18. Parshin A.V., Grebenkin N.A., Morozov V.A., Rzhetskaya A.K., Shikalenko F.N. The first results of methodological work on the application of bespilot airborne geophysical technologies at the stage of prospecting of uranium deposits. *Exploration and protection of the subsoil*. 2017;11:59-64. (In Russ.). EDN: YTHJUE.

19. Parshin A.V., Blinov A.V., Kosterev A.N., Budyak A.E., Morozov V.A. Low-altitude geophysical magnetic prospecting based on multirotor UAV as a promising replacement for traditional ground survey. *Geo-spatial Information Science*. 2018;21(1):67-74. EDN: XXHXRZ. <https://doi.org/10.1080/10095020.2017.1420508>.

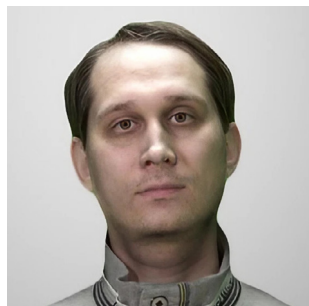
20. Malehmir A., Dynesius L., Paulusson K., Paulusson K., Johansson H., Bastani M., et al. The potential of rotary-wing UAV-based magnetic surveys for mineral exploration: a case study from central Sweden. *The Leading Edge*. 2017;36(7):552-557. <https://doi.org/10.1190/tle36070552.1>.

21. Nasyrtidinov B., Latipov R., Khassanov D., Popov M., Usmanov A. Assessment of the impact of unmanned aerial vehicles with different engine types on the MMPOS-1 magnetometer. In: *20th International Multidisciplinary Scientific GeoConference SGEM 2020*. Albena; 2020. p. 475-482. <https://doi.org/10.5593/sgem2020/1.2/s05.061>. EDN: QXSJQX.

22. Burov B.V. *Geology of Tatarstan. Stratigraphy and tectonics*. Moscow: GEOS; 2003, 402 p. (In Russ.).



Информация об авторах / Information about the authors



Насыртдинов Булат Мансурович,

старший преподаватель кафедры геофизики и геоинформационных технологий,
Институт геологии и нефтегазовых технологий,
Казанский (Приволжский) федеральный университет,
г. Казань, Россия,

✉ Bulat.Nasyrtdinov@kpfu.ru

<https://orcid.org/0000-0002-6359-9159>

Bulat M. Nasyrtdinov,

Senior Lecture of the Department of Geophysics and Geoinformation Technologies,
Institute of Geology and Petroleum Technologies,
Kazan (Volga Region) Federal University,
Kazan, Russia,

✉ Bulat.Nasyrtdinov@kpfu.ru

<https://orcid.org/0000-0002-6359-9159>



Старовойтов Александр Владимирович,

ассистент кафедры геофизики и геоинформационных технологий,
Институт геологии и нефтегазовых технологий,
Казанский (Приволжский) федеральный университет,
г. Казань, Россия,

Alexander.Starovoytov@kpfu.ru

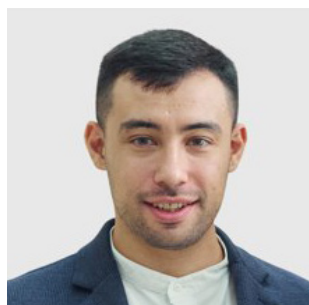
<https://orcid.org/0000-0003-0584-1733>

Alexsandr V. Starovoytov,

Assistant Professor of the Department of Geophysics
and Geoinformation Technologies,
Institute of Geology and Petroleum Technologies,
Kazan (Volga Region) Federal University,
Kazan, Russia,

Alexander.Starovoytov@kpfu.ru

<https://orcid.org/0000-0003-0584-1733>



Хамиев Марсель Маратович,

инженер междисциплинарной учебной лаборатории
петрофизики и физики нефтяного пласта,
Институт геологии и нефтегазовых технологий,
Казанский (Приволжский) федеральный университет,
г. Казань, Россия,

MMHamiev@kpfu.ru

Marsel M. Khamiev,

Engineer of the Interdisciplinary University Laboratory
of Petrophysics and Oil Reservoir Physics,
Institute of Geology and Petroleum Technologies,
Kazan (Volga Region) Federal University,
Kazan, Russia,

MMHamiev@kpfu.ru

Вклад авторов / Contribution of the authors

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

Конфликт интересов / Conflict of interests

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

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

Информация о статье / Information about the article

Статья поступила в редакцию 18.09.2023; одобрена после рецензирования 26.10.2023; принята к публикации 30.11.2023.

The article was submitted 18.09.2023; approved after reviewing 26.10.2023; accepted for publication 30.11.2023.

ГЕОЛОГИЯ, ПОИСКИ И РАЗВЕДКА ТВЕРДЫХ
ПОЛЕЗНЫХ ИСКОПАЕМЫХ, МИНЕРАГЕНИЯ

Краткое сообщение

УДК 550.4:550.8

EDN: HXQZHE

DOI: 10.21285/2686-9993-2023-46-4-374-389

Эволюция орогенного золотого оруденения в структурах
южного и восточного обрамления Сибирского кратонаН.А. Горячев^a, А.Е. Будяк^b, Т.И. Михалицына^c, Ю.И. Тарасова^{d,e},
И.Н. Горячев^e, О.Т. Соцкая^f^{a,c,f}Северо-Восточный комплексный научно-исследовательский институт ДВО РАН, г. Магадан, Россия^{a,b,d}Институт геохимии им. А.П. Виноградова СО РАН, г. Иркутск, Россия^{b,d,e}Иркутский национальный исследовательский технический университет, г. Иркутск, Россия

Резюме. Целью данного исследования являлось проведение сопоставления эволюции золотого рудообразования в структурах Байкало-Патомского и Верхояно-Колымского окраинно-континентальных орогенных поясов, возникших на пассивной окраине Сибирского континента в неопротерозое – палеозое и палеозое – мезозое и вмещающих самые крупные месторождения золота России. Отмечены черты сходства, зафиксированные не только в характеристиках этапности минерализации, но и в типоморфизме пирита – главного минерала рудных образований. Показана роль полихронных орогенных событий палеозойского и позднемезозойского времени, приведших к формированию крупных складчатых поясов в развитии масштабной золотой минерализации южного и восточного обрамления Сибирского кратона. Эти события вызывали мобилизацию и перераспределение благородных металлов из обогащенных ими стратиграфических горизонтов в результате формирования соответствующих орогенных плутонометаморфических поясов. Сравнительный анализ палеозойско-мезозойского и неопротерозойско-палеозойского металлогенических профилей южной и восточной окраин Сибирского кратона демонстрирует влияние процессов формирования орогенного золотого оруденения независимо от состава вмещающих толщ и возраста оруденения. Общие металлогенические характеристики палео-геодинамических обстановок формирования благороднометалльного оруденения орогенного типа независимо от его возраста могут послужить основой для геолого-генетических и прогнозных построений и выработки комплексных критериев оценки перспектив в пределах рассмотренных регионов.

Ключевые слова: Байкало-Патомский и Верхояно-Колымский орогенные пояса, золотое оруденение орогенного типа, пирит

Финансирование: Исследование проведено в рамках выполнения государственного задания по проектам Северо-Восточного комплексного научно-исследовательского института ДВО РАН 121031700301-5 и Института геохимии СО РАН IX.130.3.1 (№ 0284-2021-0001), а также частично в рамках работ по проекту Научно-образовательного центра «Север: территория устойчивого развития». Аналитические исследования химического состава пород и руд осуществлены в Центре коллективного пользования «Изотопно-геохимических исследований» Института геохимии СО РАН. Подготовка материала проведена на анализаторе фрагментов микроструктуры твердых тел «Минерал С7» с линией пробоподготовки в Межрегиональном научно-образовательном центре «Байкал».

Для цитирования: Горячев Н.А., Будяк А.Е., Михалицына Т.И., Тарасова Ю.И., Горячев И.Н., Соцкая О.Т. Эволюция орогенного золотого оруденения в структурах южного и восточного обрамления Сибирского кратона // Науки о Земле и недропользование. 2023. Т. 46. № 4. С. 374–389. <https://doi.org/10.21285/2686-9993-2023-46-4-374-389>. EDN: HXQZHE.



GEOLOGY, PROSPECTING AND EXPLORATION OF SOLID MINERALS, MINERAGENY

Brief report

Evolution of orogenic gold mineralization in the southern and eastern framing structures of the Siberian craton

Nikolay A. Goryachev^a, Alexander E. Budyak^b, Tatiana I. Mikhaliitsyna^c,
Yulia I. Tarasova^d, Ivan N. Goryachev^e, Olga T. Sotskaya^f

^{a,c,f}North-East Interdisciplinary Scientific Research Institute named after N.A. Shilo FEB RAS, Magadan, Russia

^{a,b,d}A.P. Vinogradov Institute of Geochemistry SB RAS, Irkutsk, Russia

^{b,d,e}Irkutsk National Research Technical University, Irkutsk, Russia

Abstract. The purpose of the research is to compare the evolution of gold ore mineralization in the structures of the Baikal-Patom and Verkhoyansk-Kolyma marginal continental orogenic belts that arose on the passive margin of the Siberian continent in the Neoproterozoic-Paleozoic and Paleozoic-Mesozoic, and hosting the largest gold deposits in Russia. The similarities are noted as they reveal themselves in the characteristics of the mineralization stages, and in the typomorphism of pyrite that is the main mineral of ore formations. The study demonstrated the role of polychronic orogenic events of the Paleozoic and late Mesozoic times, which led to the formation of large fold belts in the development of large-scale gold mineralization of the southern and eastern framing of the Siberian craton. These events caused precious metals to mobilize and redistribute from precious metal-rich stratigraphic horizons as corresponding orogenic plutonometamorphic belts were formed. A comparative analysis of the Paleozoic-Mesozoic and Neoproterozoic-Paleozoic metallogenic profiles of the southern and eastern margins of the Siberian craton demonstrates the influence of the formation processes of orogenic gold mineralization, regardless of the composition of the host strata and mineralization age. General metallogenic characteristics of paleogeodynamic formation settings of noble metal mineralization of the orogenic-type, regardless of its age, can serve as the basis for geological-genetic and forecasting predictions as well as for the development of integrated assessment criteria for their prospects within the regions under investigation.

Keywords: Baikal-Patom and Verkhoyansk-Kolyma orogenic belts, orogenic gold mineralization, pyrite

Funding: The study was conducted as a part of the implementation of the state assignment on the projects of the North-East Interdisciplinary Scientific Research Institute FEB RAS 121031700301-5 and A.P. Vinogradov Institute of Geochemistry SB RAS IX.130.3.1 (no. 0284-2021-0001), and partly within the frameworks of the project of the Scientific and Educational Center "North: Territory of Sustainable Development". The analytical studies of the chemical composition of rocks and ores were carried out at the Resource Sharing Center "Isotope-Geochemical Research" of the A.P. Vinogradov Institute of Geochemistry SB RAS. The material was prepared by the "Mineral C7" analyzer of solid body microstructure fragments with a sample preparation line at "Baikal" Interregional Scientific and Educational Center.

For citation: Goryachev N.A., Budyak A.E., Mikhaliitsyna T.I., Tarasova Yu.I., Goryachev I.N., Sotskaya O.T. Evolution of orogenic gold mineralization in the southern and eastern framing structures of the Siberian craton. *Nauki o Zemle i nedropol'zovanie = Earth sciences and subsoil use*. 2023;46(4):374-389. (In Russ.). <https://doi.org/10.21285/2686-9993-2023-46-4-374-389>. EDN: HXQZHE.

Введение

Сибирский кратон представляет собой жесткую раннедокембрийскую структуру, обрамленную разновозрастными складчатыми поясами, которые возникли в период между неопротерозоем и поздним мезозоем. Каждый из этих поясов является весьма продуктивным на золото и содержит очень крупные золоторудные месторождения. Стабильное положение кратона с мезопротерозоя привело к его окружению пассивными континентальными окраинами, развитие которых шло двумя путями. На современном южном фланге кратонной окраины мезо-неопротерозойская пассивная окраина сменилась задуговыми бассейнами в венде – раннем палеозое, на восточном краю обстановка пассивной окраины существовала вплоть до

конца мезозоя. В дальнейшем южный и юго-западный фланги наращивались за счет приращения подвижных поясов каледонид, герцинид и мезозойд с формированием золоторудных поясов соответствующего возраста, а на восточном фланге выдающаяся золотоносность была сформирована практически в один позднемезозойский этап.

Цель предлагаемого исследования заключалась в проведении сопоставления эволюции золотого орогенного оруденения двух крупных золоторудных территорий России для создания основы геолого-генетических и минералого-геохимических моделей происхождения крупных скоплений благородных металлов как продуктов длительной эволюции региональных геологических структур.



Материалы и методы исследования

Объектами представленного в настоящем материале исследования служат структуры южного и восточного обрамления Сибирского кратона, которые возникли на месте его пассивной окраины в неопротерозое – палеозое (Байкало-Патомский складчатый пояс) и палеозое – мезозое (Верхояно-Колымский складчатый пояс), а также локализованные в них крупнейшие в России месторождения золота орогенного типа. Авторы много лет ведут исследования золотоносности указанных структур и локализованных в них золоторудных месторождений с позиций как общего тектоно-металлогенического анализа, так и детальных методов седиментологии, геохронологии, общей и изотопной геохимии, тонких минералогических исследований на современной аппаратуре. В ходе работы проведено сопоставление изученных струк-

тур и месторождений на основе обзора полученных нами результатов такого комплексного исследования наряду с литературными данными других исследователей. Аналитические исследования химического состава пород и руд проводились в Центре коллективного пользования «Изотопно-геохимических исследований» Института геохимии СО РАН. Подготовка материала проведена на анализаторе фрагментов микроструктуры твердых тел «Минерал С7» с линией пробоподготовки в Межрегиональном научно-образовательном центре «Байкал».

Результаты исследования и их обсуждение

Региональная позиция. Как уже отмечено выше, Сибирский кратон представляет собой жесткую раннедокембрийскую структуру, окруженную складчатыми поясами (рис. 1), которые возникли в период с неопротерозоя –

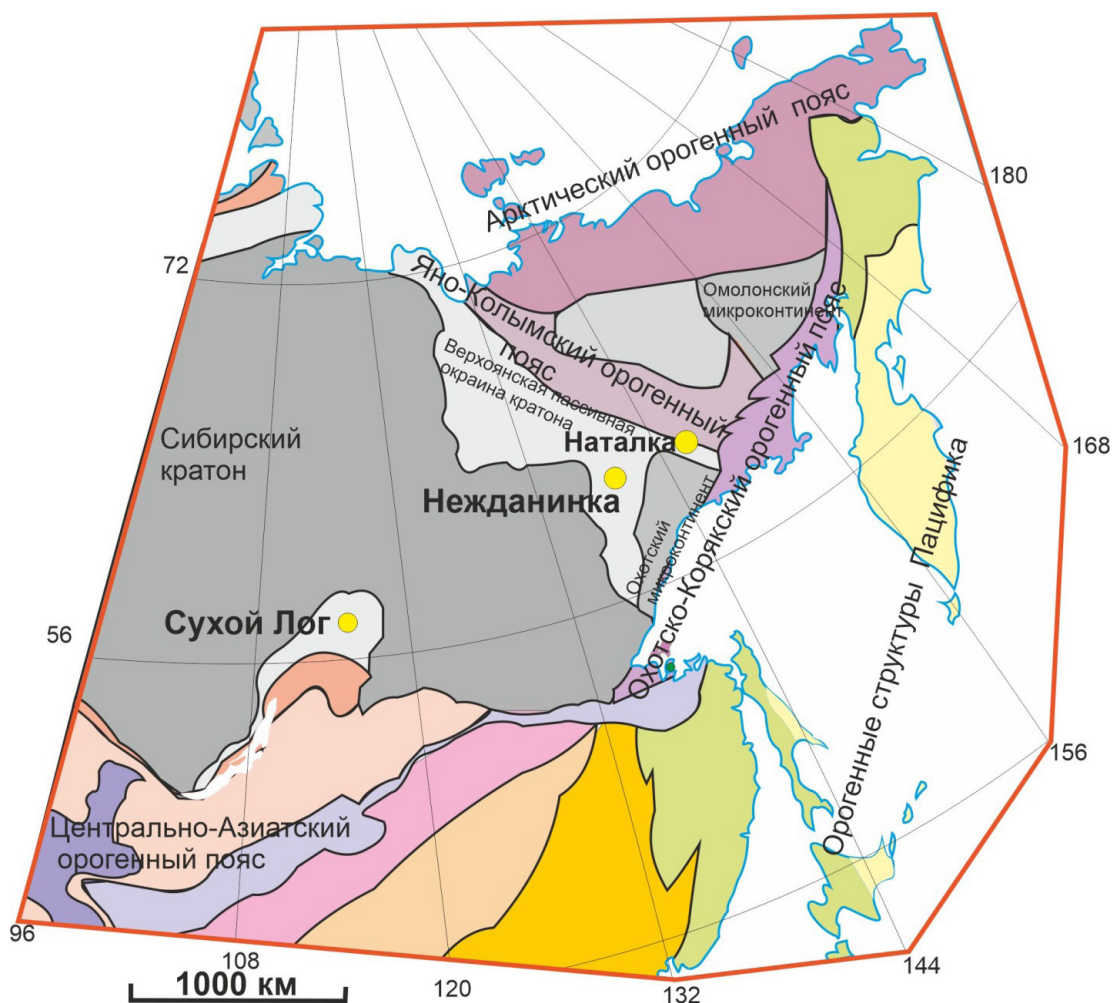


Рис. 1. Позиция крупнейших месторождений золота России в структурах обрамления Сибирского кратона
Fig. 1. Position of the major gold deposits in Russia in the framing structures of the Siberian craton



палеозоя (южный фланг) до палеозоя – позднего мезозоя (восточный фланг). Они возникли на месте крупных морских бассейнов пассивной окраины Сибирского континента, существовавших в неопротерозое – раннем палеозое на юге в современных координатах и в неопротерозое – начале позднего мезозоя на востоке [1, 2]. В указанных монографиях приводятся исчерпывающие характеристики данных структур и бассейнов, что освобождает нас от необходимости повторяться. Важнейшей чертой этих структур является то, что они вмещают крупнейшие месторождения золота России, такие как Сухой Лог, Наталка, Нежданинка.

Месторождение Сухой Лог расположено в центральной части Байкало-Патомского нагорья и приурочено к периклинальной части субширотной Сухоложской антиклинали – составной части Бодайбинского синклинория [3]. Ядро антиклинали сложено терригенно-углеродистыми отложениями хомолхинской свиты, на ее крыльях располагаются терригенно-известковистые породы имнянской свиты. Метаморфические преобразования пород отвечают хлорит-серицитовый субфации зеленосланцевой фации. Рудовмещающей является зона рассланцевания и интенсивных пластических деформаций, развивающаяся по тонкозернистым породам хомолхинской свиты. Промышленное прожилково-вкрапленное золотосульфидное оруденение представлено крупной рудной зоной ленточного типа северо-западного простирания и северо-восточного падения протяженностью около 4 км, локализованной в замке сильно сжатой антиклинальной складки, возможно, принадлежит к тому же происхождению. Магматизм в пределах месторождения не проявлен. Ближайшее тело гранитов – датированный поздним карбоном – ранней пермью Константиновский шток – расположен в 6 км южнее месторождения.

Рудная залежь состоит из вкрапленного сульфидного (преобладает пирит) оруденения в сочетании с прожилковым сульфидно-кварцевым оруденением и с поздними золотоносными кварцевыми жилами. Руды формировались в два этапа – каледонский и герцинский [4]. Они представлены главным образом ассоциацией, состоящей из пирита (четвертой генерации), небольшого количества арсенопирита, а также пирротина, кварца, серицита, железо-магнезиальных карбонатов. Структурные особенности пород деформированного ядра

антиклинали (изоклинали складчатость, кливаж, метаморфическая слоистость, будинаж, деформации ранних складок, взаимоотношения между сульфидно-кварцевыми прожилками и поздними кварцевыми жилами и пр.) указывают на многократное проявление деформаций. Углеродистое вещество рассеяно во всей массе пород, а также концентрируется в промежутках между минералами либо по кливажным трещинам, ко всему прочему оно образует микровкрапленность в пиритах, формируя их сотовую структуру, его количество достигает 5 % [5]. Ранние генерации пирита (первая, вторая) отделены от рудоносного пирита третьей генерации этапом метаморфических преобразований, на котором происходило формирование пирротина в условиях зеленосланцевого метаморфизма [6]. Отличие пирита четвертой генерации по всем признакам указывает на то, что пострудная минерализация, включая кварцевые жилы, формировалась из флюида с более легким изотопным составом серы ($\delta^{34}\text{S}$ меньше 5 ‰).

Морфологические, геохимические и изотопные характеристики выявленных генераций сульфидов железа месторождений Сухой Лог, Голец Высочайший и Угахан отражают единую эволюцию рудообразующей системы во время их формирования. Новые данные показали важную роль пирита как индикатора условий формирования рудной минерализации, который по составу, изотопии серы и морфологическим особенностям характеризуется полной однотипностью генераций, несмотря на несколько разное геологическое положение месторождений. Это подтверждается не только сравнением с ранее изученными объектами в отношении минералогических данных, но и новыми результатами аргон-аргонового датирования фракций пирита [7].

Месторождение Наталка, расположенное на северо-востоке России, является крупнейшим месторождением золота, занимая второе место по запасам среди месторождений нашей страны. Оно локализовано среди пермских терригенных (песчаники, диамиктиты, алевролиты) отложений Аян-Юрхского антиклинория юго-восточного фланга Яно-Колымского орогенного пояса, смятых в крупноамплитудные складки. Они рассечены продольными разломами и серией даек дорудных лампрофиров и гранит-порфиров. Аргон-аргоновое датирование по серициту измененных даек показало 135 млн лет [8]. Попытка прямого



датирования руд [9] не позволила получить надежных датировок, определив возможный интервал рудообразования 136–132 млн лет. Согласно современным взглядам, оруденение месторождения сконцентрировано в едином крупном (4×1 км) теле, прослеженном на глубину более 500 м. Руды представляют собой сочетание прожилковых зон сульфидно-кварцевой минерализации мощностью 2–25 м и протяженностью 100–500 м, образующих своеобразный жильный каркас рудного тела с ареалом вкрапленной пирит-арсенопиритовой минерализации (1–10 % сульфидов). Собственно структура месторождения сформирована в два этапа: ранний этап орогенного поднятия и формирования разломов с взбросо-надвиговой кинематикой и поздний этап орогенного расширения со сбросо-сдвиговыми движениями по разломам. Минеральный состав руд достаточно простой: минералами жил и метасоматитов являются кварц, серицит, хлорит, кальцит, рудными минералами – пирит, арсенопирит, пирротин, галенит, сфалерит, халькопирит, шеелит, золото (пробностью 497–814 ‰), реже встречены тетраэдрит (5,7–18,6 % серебра), кобальтовый арсенопирит и кобальтин [10]. Указанные особенности позволяют считать это месторождение типично орогенным. Следует отметить также наличие в пределах рудного поля, вероятно, поздней антимонитовой минерализации, проявленной в кислой дайке [10] на фланге месторождения. Околорудные метасоматиты представлены во внешних зонах хлорит-карбонатными, во внутренних – серицит-кварцевыми и альбит-кварцевыми метасоматитами. Рудное тело месторождения фиксируется в обширных аномалиях золота, мышьяка и вольфрама. Данные по геохимии редких земель и изучению флюидных включений предполагают формирование руд из существенно магматического источника при небольшом вкладе метаморфических флюидов [11].

Нежданинское месторождение входит в пятерку крупнейших месторождений золота России по запасам. Оно расположено на западе Охотско-Корякского орогена в позднеюрской–раннемеловой Аллах-Юньской металлогенической зоне. Нежданинское месторождение локализовано в северной части Южно-Верхоянского сектора Верхоянского складчато-надвигового пояса в тылу Удско-Мургальской (J_3 – K_1) окраинно-континентальной дуги. Верхоянский складчато-надвиговый пояс

залегает на архейско-протерозойском фундаменте, перекрытом терригенно-карбонатными отложениями протерозоя – палеозоя и мезозоя, слагающими пассивную окраину Сибирского кратона. Структура Нежданинского месторождения определяется линейной брахиантиклиналью северо-северо-восточного простирания в сочетании с региональным Кидерикинским разломом близкой ориентировки. Вмещающие породы представлены нижнепермскими алевритами и песчаниками, метаморфизованными до уровня начальных ступеней зеленосланцевой фации метаморфизма. В пределах рудных зон они изменены с развитием серицита, хлорита, кварца, анкерита. В пределах рудного поля зафиксировано два этапа магматизма:

1. Раннемеловой – дайки лампрофиров и диорит-порфиров и небольшие тела гранитов на заметном удалении с датами ~121 млн лет (циркон, U-Pb (ID-TIMS) метод) [12] и 122 млн лет [13].

2. Позднемеловой в виде небольших интрузивов диорит-гранодиорит-гранитного состава с датой 94 млн лет (циркон, U-Pb (ID-TIMS) метод) [12].

Согласно А.В. Прокопьеву с соавторами [14], возраст метаморфических приразломных образований близок к первому этапу магматизма и составляет 120–119 Ма по данным аргон-аргонового датирования, что совпадает с результатами рубидий-стронциевого датирования кварца [15].

Главным рудным телом месторождения является минерализованная зона № 1, сложенная тектонически переработанными осадочными породами с вкрапленным пирит-арсенопиритовым и прожилково-вкрапленным оруденением с линзой метасоматического кварца в осевой зоне и оперяющими кварцевыми жилами с богатым золотым оруденением (жилы 8, 14 и пр.). Формирование Нежданинского месторождения происходило в течение трех этапов:

1. Метаморфогенный этап кварц-карбонатных слабо золотоносных жил.

2. Главный этап формирования пирит-арсенопиритовой вкрапленной и золото-кварцевой прожилково-жильной минерализации.

3. Этап наложения серебро-полиметаллической минерализации с низкопробным золотом и перекристаллизованным кварцем.

Данные по изучению флюидного режима минералообразования, изотопный состав кис-



лорода, углерода, серы и свинца, а также сведения по геохимии редких и редкоземельных элементов свидетельствуют об участии в рудообразовании магматических и метаморфических источников [16, 17].

Таким образом, даже при краткой характеристике этих крупных объектов отчетливо выявляется сложная история формирования их руд независимо от времени их образования. Эта история разбивается на три этапа: дорогенный (формирования осадочных рудовмещающих толщ), главный орогенный и второстепенный этап наложенного орогенного события.

Доорогенная история. Стабильное положение кратона с мезопротерозоя привело к его окружению пассивными континентальными окраинами, развитие которых шло двумя путями. На современном южном фланге кратонной окраины мезо-неопротерозойская пассивная окраина сменилась задугowymi бассейнами в конце неопротерозоя [18, 19], на восточном краю обстановка пассивной окраины существовала вплоть до конца мезозоя в сочетании с позднепалеозойскими и раннемезозойскими задугowymi бассейнами [20].

Байкало-Патомский сектор Саяно-Байкальского орогенного пояса представляет собой деформированный средне-позднепротерозойский – неопротерозойско-раннепалеозойский бассейн пассивной континентальной окраины, на который наложился процесс задугового спрединга в неопротерозое [18]. Это зафиксировано наличием в разрезе черносланцевых горизонтов, обогащенных углеродом (до 10 %) и золотом (15–20 мг/т) [21, 22], и горизонтов с вулканическим составом [19].

Верхояно-Колымский бассейн пассивной континентальной окраины [20] также характеризуется многочисленными горизонтами раннего – позднего палеозоя, обогащенными золотом (до десятков мг/т) и относительно повышенными концентрациями углерода (до 3–4 %) [23]. В пермское время на его восточном (в современных координатах) фланге возник задуговой бассейн Удско-Мургальской дуги, отложениям которого характерно относительно повышенное количество углерода (1–1,5 %) [24] и высокое – золота (до 120 мг/т) [25]. Важным фактором, указывающим на задуговую обстановку, является появление в слоях этой части разреза вулканического материала, свидетельствующего о близости дуги.

В результате осадконакопления в разновозрастных бассейнах возникли сходные по генезису горизонты, обогащенные углеродом и благородными металлами (прежде всего золотом). Петрохимические и минералогические признаки рудосодержащих пород индицируют формирование благоприятных горизонтов в отложениях пассивной континентальной окраины с добавлением ювенильного вещества в связи с процессами рифтинга (палеопротерозойского и палеозойского) или в результате рассеянного спрединга в задугowych бассейнах (конец неопротерозоя и поздний палеозой).

Орогенные события как фактор формирования золотых руд. Рассмотрим палеозойские орогенные события Байкало-Патомского пояса. Расшифровке формирования золотосодержащих тектонических структур Байкало-Патомского нагорья посвящено большое количество литературы [18, 26–30], анализ которой позволяет предложить следующую модель орогенных событий формирования этой достаточно богатой золотом провинции. Проведенные геохронологические исследования [9, 31] выделяют два этапа орогенеза в ее пределах. Ранний, главный и коллизионный, связанный с коллизией Муйского микроконтинента (кратонного террейна), фиксируется в проявлении регионального Мамского плутонометаморфического пояса с метаморфизмом амфиболитовой (до гранулитовой) фации, приведшей к формированию пояса мигматит-гранитов, датированных уран-свинцовым методом 447 млн лет [31]. Именно по флангам этого пояса и над его погруженной частью концентрируется главное золотое оруденение орогенного типа (рис. 2). Поздний этап, связанный с формированием в позднем палеозое Ангаро-Витимского батолита, привел к возникновению золото-кварцевого жильного оруденения в пределах крупных месторождений (Сухой Лог, Вернинское), а также в самостоятельных жильных образованиях (Догалдинское месторождение). На месторождении Сухой Лог для него получена дата 321 млн лет [15].

Далее рассмотрим мезозойские орогенные события Верхояно-Колымского пояса. Крупнейшие месторождения орогенного золота Верхояно-Колымского пояса, равно как и большинство других золото-кварцевых и золото-сульфидно-кварцевых месторождений и рудопроявлений, располагаются в зоне проявления фации зеленосланцевого метаморфизма орогенных плутонометаморфических



Рис. 2. Ассоциация золотого оруденения с плутоно-метаморфическим Мамско-Оронским поясом в Бодайбинском районе (составлено на основе государственной геологической карты Российской Федерации¹ с дополнениями и изменениями):

1 – PR-PZ, отложения пассивной окраины кратона; 2 – биотитовая изограда мамского метаморфизма; 3 – гранатовая изограда мамского метаморфизма; 4 – дистеновая изограда мамского метаморфизма; 5 – месторождения, рудопроявления и пункты минерализации золота; 6 – рудопроявления и пункты минерализации олова; 7 – ареалы оловоносности; 8 – ареалы золотоносности

Fig. 2. Gold mineralization association with the plutono-metamorphic Mama-Oron belt in the Bodaibo district (compiled on the basis of the state geological map of the Russian Federation¹ added and revised):

1 – PR-PZ, deposits of the passive margin of the craton; 2 – biotite isograd of Mama metamorphism; 3 – garnet isograd of Mama metamorphism; 4 – disthene isograd of Mama metamorphism; 5 – deposits, ore occurrences and sites of gold mineralization; 6 – ore occurrences and tin mineralization sites; 7 – tin-bearing areas; 8 – gold-bearing areas

поясов [32] (рис. 3) разного возраста (позднеюрско-раннемелового – Наталка, Павлик и большинство месторождений Яно-Колымского пояса; мелового – Нежданка, Ветренское, золото-сурьмяное месторождение Сарылах и пр.) [33]. Согласно современным датировкам [34–36], золотое оруденение орогенного типа формировалось в два этапа 150–135 млн лет и 130–116 млн лет, что отвечает главным орогенным событиям Яно-Колымского и Охот-

ско-Корякского орогенных поясов. Время формирования главной стадии орогенного золота после внедрения коллизионных гранитов (пик – 150 млн лет [37]) предполагает формирование основного оруденения на фоне остывания региональной плутонометаморфической системы, в то время как позднее оруденение тесно связано с процессами приразломного зонального метаморфизма, отвечающего орогенному событию на прилегающих территориях

¹ Государственная геологическая карта Российской Федерации. М-Б 1:1000000 (третье поколение). Серия Алдано-Забайкальская. Лист О-50 – Бодайбо. Объяснительная записка / сост. Л.Б. Макарьев, Г.Л. Митрофанов, Н.Н. Митрофанова, В.М. Пай, Л.К. Семейкина [и др.], ред. Г.Л. Митрофанов. СПб.: Картографическая фабрика ВСЕГЕИ, 2010. 612 с. + 7 вкл.

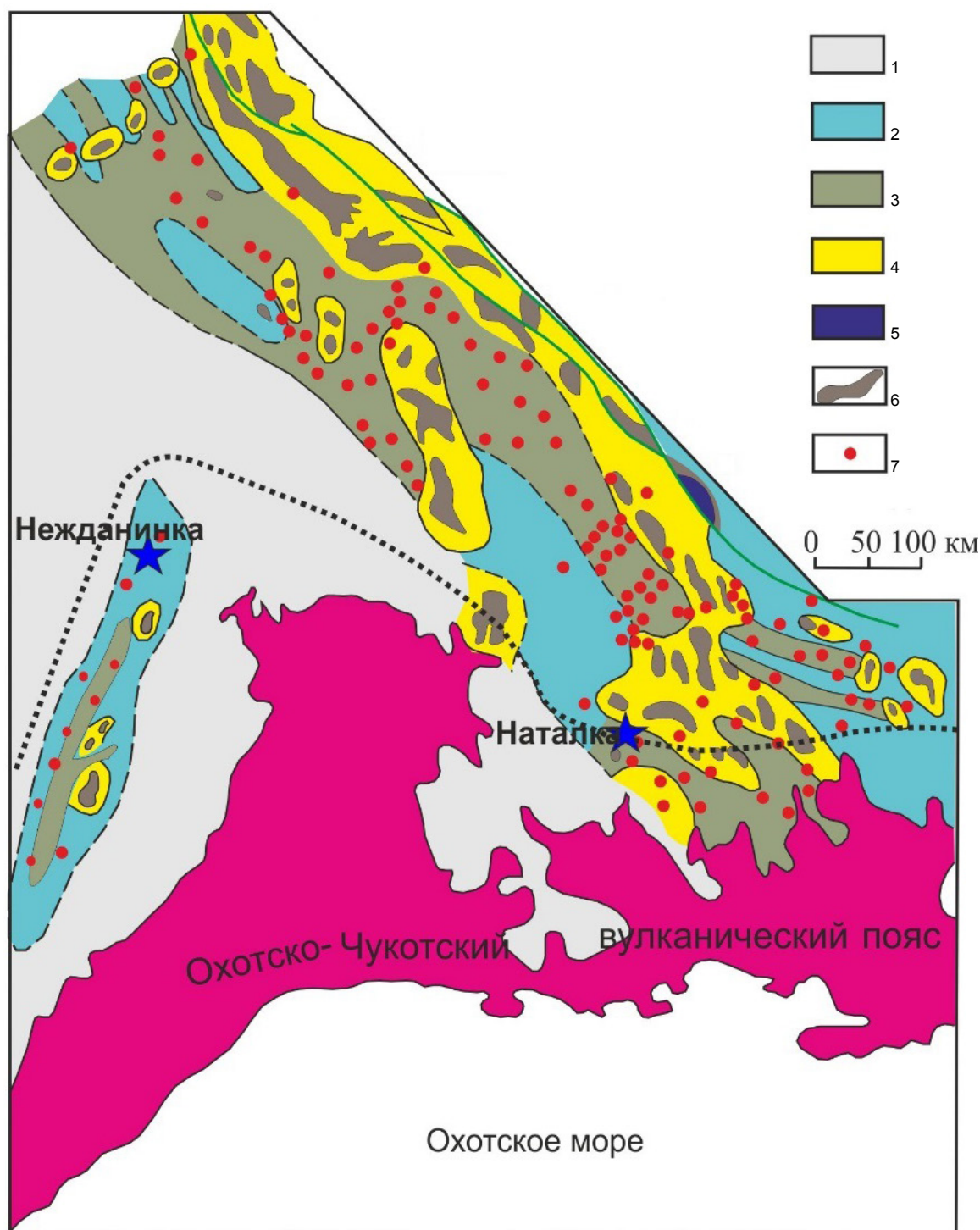


Рис. 3. Ассоциация золотого оруденения с плутоно-метаморфическими поясами Верхояно-Колымской складчатой системы [37]:

- 1 – слабо метаморфизованные породы; 2–4 – метаморфизованные породы зеленосланцевой фации: 2 – хлорит-серицитовая субфации, 3 – биотит-хлоритовой субфации, 4 – коричневого биотита и кордеита; 5 – амфиболиты; 6 – S- и I-типы гранитоида; 7 – месторождения золота

Fig. 3. Gold mineralization association with plutono-metamorphic belts of Verkhoyansk-Kolyma fold system [37]:

- 1 – weakly metamorphosed rocks; 2–4 – metamorphosed rocks of the greenschist facies: 2 – chlorite-sericite subfacies, 3 – biotite-chlorite subfacies, 4 – brown biotite and cordierite; 5 – amphibolites; 6 – S- and I-types of granitoid; 7 – gold deposits



Охотско-Корякского орогенного пояса.

Рассмотрим общие и отличительные черты орогенной минерализации разного возраста. Обстановки формирования осадочных толщ в бассейнах пассивной окраины континента с переходом в задуговые на финальной стадии их существования приводят к накоплению благородных металлов в осадочных рудовмещающих толщах, что свидетельствует об их важной роли как источника металла. В орогенной истории золотое оруденение формировалось в два этапа: ранний и главный, который включал в себя возникновение региональной плутонометаморфической системы [38] с формированием золоторудной минерализации на регрессивной стадии ее существования, а также поздний, соответствующий проявлению орогенных событий в прилегающих структурах также с формированием золотого оруденения орогенного типа [24] (с ним связано проявление поздних этапов благороднометалльного оруденения в крупных рудных месторождениях).

Важной особенностью орогенных структур является широкое (региональное) распространение пиритовой минерализации, тесно связанной с формированием золотого оруденения [39–42]. Для рассмотренных регионов установлено одинаковое количество генераций пирита, соответствующее эволюции складчатых структур (пирит седиментационный, метаморфогенно-катагенный и метаморфогенно-рудный), за исключением позднего пирита, проявленного в Бодайбинском синклинии, и их близкие типоморфные особенности (состав, термоэлектрические свойства) [39, 40–42]. Следовательно, несмотря на разное региональное нахождение и возраст окраинно-платформенных золотоносных складчатых поясов, они характеризуются общими чертами проявления золотого оруденения орогенного типа.

Отличия фиксируются в разной минерало-геохимической специализации орогенных руд. Более широкое развитие минералов мышьяка и сурьмы в месторождениях восточного фланга, вероятно, обусловлено общей зараженностью рудовмещающих толщ этими элементами [43]. С другой стороны, четкая локализация поздних золото-сурьмяных и золотых орогенных месторождений в Яно-Колымском поясе в зонах крупных сквозькоровых разломов [44] предполагает и влияние активированной мантии на эти процессы.

Заключение

Формирование масштабной золотой минерализации в южном и восточном обрамлении Сибирского кратона произошло в палеозойское и позднемезозойское время и являлось следствием полихронных орогенных событий, приведших к формированию крупных складчатых поясов. Эти события вызывали мобилизацию и перераспределение благородных металлов из обогащенных ими стратиграфических горизонтов в результате формирования соответствующих орогенных плутонометаморфических поясов. Сравнительный анализ палеозойско-мезозойского и неопротерозойско-палеозойского металлогенических профилей южной и восточной окраин Сибирского кратона позволяет говорить об универсальности процессов формирования орогенного золотого оруденения независимо от состава вмещающих толщ и возраста оруденения. Общие металлогенические характеристики палеогеодинамических обстановок формирования благороднометалльного оруденения орогенного типа независимо от его возраста могут послужить основой для геолого-генетических и прогнозных построений и выработки комплексных критериев оценки перспектив в пределах рассмотренных регионов.

Список источников

1. Геодинамика, магматизм и металлогения Дальнего Востока России / под ред. А.И. Ханчука. Кн. 1. Владивосток: Дальнаука, 2006. 572 с. EDN: QKFSVT.
2. Геодинамика, магматизм и металлогения Дальнего Востока России / под ред. А.И. Ханчука. Кн. 2. Владивосток: Дальнаука, 2006. 409 с. EDN: QKFSWD.
3. Буряк В.А., Хмелевская Н.М. Сухой Лог – одно из крупнейших золоторудных месторождений мира. Владивосток: Дальнаука, 1997. 156 с.
4. Distler V.V., Yudovskaya M.A., Mitrofanov G.L., Prokof'ev V.V., Lishnevsky E.N. Geology, composition, and genesis of the Sukhoi Log noble metals deposit, Russia // Ore Geology Reviews. 2004. Vol. 24. Iss. 1-2. P. 7–44. <https://doi.org/10.1016/j.oregeorev.2003.08.007>. EDN: KFCODN.



5. Жмодик С.М., Куликов А.А., Шестель С.Т. Распределение золота в черных сланцах Витимо-Патомского района // Геология и геофизика. 1993. № 2. С. 67–76.
6. Tarasova Yu.I., Budyak A.E., Chugaev A.V., Goryachev N.A., Tauson V.L., Skuzovatov S.Yu., et al. Mineralogical and isotope-geochemical ($\delta^{13}\text{C}$, $\delta^{34}\text{S}$ and Pb-Pb) characteristics of the Krasniy gold mine (Baikal-Patom Highlands): constraining ore-forming mechanisms and the model for Sukhoi Log-type deposits // Ore Geology Reviews. 2020. Vol. 119. P. 103365. <https://doi.org/10.1016/j.oregeorev.2020.103365>.
7. Chugaev A.V., Budyak A.E., Larionova Yu.O., Chernyshev I.V., Travin A.V., Tarasova Yu.I., et al. ^{40}Ar - ^{39}Ar and Rb-Sr age constraints on the formation of Sukhoi-Log-style orogenic gold deposits of the Bodaibo District (Northern Transbaikalia, Russia) // Ore Geology Reviews. 2022. Vol. 144. P. 104855. <https://doi.org/10.1016/j.oregeorev.2022.104855>.
8. Ньюберри Р.Дж., Лейер П.У., Ганс П.Б., Гончаров В.И., Горячев Н.А., Ворошин С.В. [и др.]. Предварительный анализ хронологии мезозойского магматизма и оруденения на северо-востоке России с учетом датировок $^{40}\text{Ar}/^{39}\text{Ar}$ и данных по рассеянным элементам изверженных и оруденелых пород // Золотое оруденение и гранитоидный магматизм Северной Пацифики: сб. тр. Всерос. совещ. (Магадан, 4–6 сентября 1997 г.). Магадан, 2000. Т. 1. С. 181–205.
9. Акинин В.В., Альшевский А.В., Ползуненков Г.О., Сергеев С.А., Сидоров А.В. Возраст орогенного золоторудного месторождения Наталка (U-Pb, $^{40}\text{Ar}/^{39}\text{Ar}$, Re-Os ограничения) // Тихоокеанская геология. 2023. Т. 42. № 6. С. 62–79. <https://doi.org/10.30911/0207-4028-2023-42-6-62-79>. EDN: SGJBWY.
10. Гончаров В.И., Ворошин С.В., Сидоров В.А. Наталкинское золоторудное месторождение. Магадан: Изд-во СВКНИИ ДВО РАН, 2002. 250 с.
11. Горячев Н.А., Викентьева О.В., Бортников Н.С., Прокофьев В.Ю., Алпатов В.А., Голуб В.Н. Наталкинское месторождение мирового класса: распределение РЗЭ, флюидные включения, стабильные изотопы кислорода и условия формирования руд (Северо-Восток России) // Геология рудных месторождений. 2008. Т. 50. № 5. С. 414–444. EDN: JSJRSX.
12. Чернышев И.В., Бахарев А. Г., Бортников Н.С., Гольцман Ю.В., Котов А.Б., Гамянин Г.Н. [и др.]. Геохронология магматических пород района золоторудного месторождения Нежданинское (Якутия, Россия): U–Pb, Rb–Sr и Sm–Nd-изотопные данные // Геология рудных месторождений. 2012. Т. 54. № 6. С. 487–512. EDN: PNQPAZ.
13. Layer P.W., Newberry R.J., Fujita K., Parfenov L.M., Trunilina V., Bakharev A. Tectonic setting of the plutonic belts of Yakutia, northeast Russia, based on $^{40}\text{Ar}/^{39}\text{Ar}$ geochronology and trace element geochemistry // Geology. 2001. Vol. 29. Iss. 2. P. 167–170. [https://doi.org/10.1130/0091-7613\(2001\)029<0167:TSOTPB>2.0.CO;2](https://doi.org/10.1130/0091-7613(2001)029<0167:TSOTPB>2.0.CO;2).
14. Прокопьев А.В., Борисенко А.С., Гамянин Г.Н., Фридовский В.Ю., Кондратьева Л.А., Анисимова Г.С. [и др.]. Возрастные рубежи и геодинамические обстановки формирования месторождений и магматических образований Верхояно-Колымской складчатой области // Геология и геофизика. 2018. Т. 59. № 10. С. 1542–1563. <https://doi.org/10.15372/GiG20181004>. EDN: YLSPTF.
15. Чугаев А.В., Чернышев И.В., Гамянин Г.Н., Бортников Н.С., Баранова А.Н. Rb–Sr-изотопная систематика гидротермальных минералов, возраст и источники вещества золоторудного месторождения Нежданинское (Якутия) // Доклады Академии наук. 2010. Т. 434. № 4. С. 534–539. EDN: NBSZUH.
16. Бортников Н.С., Гамянин Г.Н., Викентьева О.В., Прокофьев В.Ю., Алпатов В.А., Бахарев А.Г. Состав и происхождение флюидов в гидротермальной системе Нежданинского золоторудного месторождения (Саха Якутия, Россия) // Геология рудных месторождений. 2007. Т. 49. № 2. С. 99–145. EDN: HZRSZH.
17. Чернышев И.В., Бортников Н.С., Чугаев А.В., Гамянин Г.Н., Бахарев А.Г. Источники металлов крупного орогенного золоторудного Нежданинского месторождения (Якутия, Россия): результаты высокоточного изучения изотопного состава свинца (MC-ICP-MS) и стронция // Геология рудных месторождений. 2011. Т. 53. № 5. С. 395–418. EDN: OJGRCL.
18. Будяк А.Е., Горячев Н.А., Скузоватов С.И. Геодинамические предпосылки формирования масштабного оруденения в южном обрамлении Сибирского кратона в протерозое // Доклады академии наук. 2016. Т. 470. № 5. С. 562–565. <https://doi.org/10.7868/S0869565216290181>. EDN: WLNNIH.
19. Будяк А.Е., Скузоватов С.Ю., Тарасова Ю.И., Ванг К.Л., Горячев Н.А. Единая неопротерозойская-раннепалеозойская эволюция рудоносных осадочных комплексов юга Сибирского кратона // Доклады Академии наук. 2019. Т. 484. № 3. С. 335–339. <https://doi.org/10.31857/S0869-56524843335-339>. EDN: MIMDQW.
20. Худoley А.К., Гурьев Г.А. Южное Верхоянье – пример среднепалеозойско-мезозойской пассивной окраины // Доклады Академии наук. 1998. Т. 362. № 5. С. 666–669.
21. Немеров В.К., Станевич А.М., Развозжаева Э.А., Будяк А.Е., Корнилова Т.А. Биогенно-седиментационные факторы рудообразования в неопротерозойских толщах Байкало-Патомского региона // Геология и геофизика. 2010. Т. 51. № 5. С. 729–747. EDN: MKTVOD.



22. Parshin A., Bashkeev A., Davidenko Y., Persova M., Iakovlev S., Bukhalov S., et al. Lightweight unmanned aerial system for time-domain electromagnetic prospecting – the next stage in applied UAV-geophysics // *Applied Sciences* (Switzerland). 2021. Vol. 11. P. 2060. <https://doi.org/10.13140/RG.2.2.21200.23042>.
23. Кокин А.В. Новые данные по золотоносности осадочных пород юго-восточного обрамления Сибирской платформы // *Доклады Академии наук*. 1990. Т. 313. № 3. С. 697–699.
24. Ведерников И.Л. Распределение органического углерода в золотоносных толщах перми Аян-Юряхского антиклинория // *Чтения памяти академика К.В. Симакова: тез. докл. Всерос. науч. конф. (г. Магадан, 25–27 ноября 2009 г.)*. Магадан, 2009. С. 43–44. EDN: TBNZVP.
25. Михалицына Т.И. Литология и геохимия верхнепермских пород Аян-Юряхского антиклинория на примере разреза руч. Тихоня (Магаданская область) // *Вестник Северо-Восточного научного центра ДВО РАН*. 2014. № 4. С. 17–28. EDN: THKYXV.
26. Иванов А.И. Золото Байкало-Патома (геология, оруденение, перспективы). М.: Изд-во ЦНИГРИ. 2017. 215 с. EDN: ZOIMFF.
27. Блинов А.В., Паршин А.В., Костерев А.Н. Особенности постановки геофизических методов поисков золотоурановых объектов в горных районах Северного Забайкалья // *Известия Сибирского отделения секции наук о Земле Российской академии естественных наук. Геология, поиски и разведка рудных месторождений*. 2014. № 1. С. 55–60. EDN: UMIVTT.
28. Паршин А.В., Будяк А.Е., Блинов А.В., Костерев А.Н., Морозов В.А., Михалев А.О. [и др.] Низковысотная беспилотная аэромагниторазведка в решении задач крупномасштабного структурно-геологического картирования и поисков рудных месторождений в сложных ландшафтных условиях. Часть 2 // *География и природные ресурсы*. 2016. № 56. С. 150–155. [https://doi.org/10.21782/GIPR0206-1619-2016-6\(150-155\)](https://doi.org/10.21782/GIPR0206-1619-2016-6(150-155)). EDN: XQRZBR.
29. Бабяк В.Н., Блинов А.В., Тарасова Ю.И., Будяк А.Е. Новые данные о геолого-структурных особенностях золоторудных месторождений Ожерелье, Ыканское, Угахан и Голец Высочайший // *Науки о Земле и недропользование*. 2019. Т. 42. № 4. С. 388–412. <https://doi.org/10.21285/2686-9993-2019-42-4-388-412>. EDN: UWHZEJ.
30. Блинов А.В., Тарасова Ю.И. Минералого-петрографическая характеристика месторождения Угахан // *Науки о Земле и недропользование*. 2020. Т. 43. № 2. С. 160–176. <https://doi.org/10.21285/2686-9993-2020-43-2-160-176>. EDN: URLQFK.
31. Зорин Ю.А., Мазукабзов А.М., Гладкочуб Д.П., Донская Т.В., Пресняков С.Л., Сергеев С.А. Силурийский возраст главных складчатых деформаций рифейских отложений Байкало-Патомской зоны // *Доклады Академии наук*. 2008. Т. 423. № 2. С. 228–233. EDN: JTXFAD.
32. Горячев Н.А. Происхождение золото-кварцевых жильных поясов Северной Пацифики. Магадан: Изд-во СВКНИИ ДВО РАН, 2003. 143 с. EDN: QKEBMV.
33. Горячев Н.А., Соцкая О.Т., Горячев И.Н., Михалицына Т.И. Минералого-геохимические особенности раннемелового золотого оруденения восточного фланга Яно-Колымского орогенного пояса (Магаданская область, Россия) // *Тихоокеанская геология*. 2023. Т. 42. № 6. С. 80–95. <https://doi.org/10.30911/0207-4028-2023-42-6-80-95>. EDN: LVMTTG.
34. Goryachev N.A., Pirajno F. Gold deposits and gold metallogeny of Far East Russia // *Ore Geology Reviews*. 2014. Vol. 59. P. 123–151. <https://doi.org/10.1016/j.oregeorev.2013.11.010>.
35. Goldfarb R.J., Taylor R.D., Collins G., Goryachev N.A., Orlandini O. Phanerozoic continental growth and gold metallogeny of Asia // *Gondwana Research*. 2014. Vol. 25. Iss. 1. P. 49–102. <https://doi.org/10.1016/j.gr.2013.03.002>.
36. Фридовский, В.Ю., Горячев Н.А., Крымский Р.Ш., Кудрин М.В., Беляцкий Б.В., Сергеев С.А. Возраст золотого оруденения Яно-Колымского металлогенического пояса, Северо-Восток России, первые данные по Re-Os изотопной геохронологии самородного золота // *Тихоокеанская геология*. 2021. Т. 40. № 4. С. 18–32. <https://doi.org/10.30911/0207-4028-2021-40-4-18-32>. EDN: HLDPRX.
37. Акинин В.В., Прокопьев А.В., Торо Х., Миллер Э.Л., Вуден Дж., Горячев Н.А. [и др.]. U-Pb SHRIMP возраст гранитоидов Главного батолитового пояса (Северо-Восток Азии) // *Доклады Академии наук*. 2009. Т. 426. № 2. С. 216–221. <https://doi.org/10.1134/S1028334X09040217>. EDN: KAVTCR.
38. Tarasova Yu.I., Budyak A.E., Ivanov A.V., Goryachev N.A., Ignatiev A.V., Velivetskaya T.A., et al. Indicator and isotope geochemical characteristics of iron sulfides from the Golets Vysochaishy deposit, East Siberia // *geology of ore deposits*. 2022. Vol. 64. Iss. 7. P. 503–512. <https://doi.org/10.1134/S1075701522070108>.
39. Тарасова Ю.И., Будяк А.Е., Горячев Н.А., Игнатьев А.В., Веливецкая Т.А., Блинов А.В. [и др.]. Типоморфизм сульфидов золоторудного месторождения Угахан (Байкало-Патомское нагорье) // *Доклады Российской академии наук. Науки о Земле*. 2022. Т. 503. № 1. С. 12–17. <https://doi.org/10.31857/S2686739722030136>. EDN: EOJDKO.
40. Горячев Н.А., Мишунин В.И., Горячева Е.М., Соцкая О.Т., Тарасова Ю.И., Будяк А.Е. Термо-ЭДС сульфидов:



возможности метода и значение для минералогических исследований (на примере изучения пирита и арсенопирита золоторудных месторождений восточного и южного обрамления Сибирского кратона) // Вестник Северо-Восточного научного центра ДВО РАН. 2022. № 3. С. 41–55. <https://doi.org/10.34078/1814-0998-2022-3-41-55>. EDN: KBDJHF.

41. Соцкая О.Т., Семышев Ф.И., Малиновский М.А., Альшевский А.В., Ливач А.Э., Горячев Н.А. Пирит зон сульфидизации терригенных комплексов Яно-Колымского орогенного пояса (Северо-Восток России): генерации, типохимизм, минеральные ассоциации // Вестник Северо-Восточного научного центра ДВО РАН. 2022. № 1. С. 14–30. <https://doi.org/10.34078/1814-0998-2022-1-14-30>. EDN: QFRYIL.

42. Тарасова Ю.И., Будяк А.Е. Стадийность формирования рудной зоны Холоднинского колчеданно-полиметаллического месторождения // Науки о Земле и недропользование. 2023. Т. 46. № 2. С. 201–211. <https://doi.org/10.21285/2686-9993-2023-46-2-201-211>. EDN: RANYSC.

43. Кокин А.В. Мышьяковая Южно-Верхоянская провинция // Геология и геофизика. 1985. Т. 26. № 1. С. 74–81.

44. Горячев И.Н. Mineral prospectivity mapping для прогноза месторождений золота и металлогенического районирования Центрально-Колымского региона (Магаданская область, Россия) // Геоинформатика. 2023. № 1. С. 4–17. <https://doi.org/10.47148/1609-364X-2023-1-4-17>. EDN: RJRSJL.

References

1. Khanchuk A.I. *Geodynamics, magmatism and metallogeny of Eastern Russia*. Book 1. Vladivostok: Dalnauka; 2006, 572 p. (In Russ.). EDN: QKFSVT.

2. Khanchuk A.I. *Geodynamics, magmatism and metallogeny of Eastern Russia*. Book 2. Vladivostok: Dalnauka; 2006, 409 p. (In Russ.). EDN: QKFSDW.

3. Buryak V.A., Khmelevskaya N.M. *Sukhoi Log – one of the largest gold deposits in the world*. Vladivostok: Dalnauka; 1997, 156 p. (In Russ.).

4. Distler V.V., Yudovskaya M.A., Mitrofanov G.L., Prokof'ev V.V., Lishnevsky E.N. Geology, composition, and genesis of the Sukhoi Log noble metals deposit, Russia. *Ore Geology Reviews*. 2004;24(1-2):7-44. <https://doi.org/10.1016/j.oregeorev.2003.08.007>. EDN: KFCODN.

5. Zhmodik S.M., Kulikov A.A., Shestel' S.T. Distribution of gold in black shales of the Vitimo-Patom region. *Geologiya i geofizika*. 1993;2:67-76. (In Russ.).

6. Tarasova Yu.I., Budyak A.E., Chugaev A.V., Goryachev N.A., Tauson V.L., Skuzovatov S.Yu., et al. Mineralogical and isotope-geochemical ($\delta^{13}\text{C}$, $\delta^{34}\text{S}$ and Pb-Pb) characteristics of the Krasniy gold mine (Baikal-Patom Highlands): constraining ore-forming mechanisms and the model for Sukhoi Log-type deposits. *Ore Geology Reviews*. 2020;119:103365. <https://doi.org/10.1016/j.oregeorev.2020.103365>.

7. Chugaev A.V., Budyak A.E., Larionova Yu.O., Chernyshev I.V., Travin A.V., Tarasova Yu.I., et al. ^{40}Ar - ^{39}Ar and Rb-Sr age constraints on the formation of Sukhoi-Log-style orogenic gold deposits of the Bodaibo District (Northern Transbaikalia, Russia). *Ore Geology Reviews*. 2022;144:104855. <https://doi.org/10.1016/j.oregeorev.2022.104855>.

8. Newberry R.G., Leyer P.U., Gans P.B., Goncharov V.I., Goryachev N.A., Voroshin S.V. Preliminary chronology analysis of Mesozoic magmatism and mineralization in the North-East of Russia taking into account $^{40}\text{Ar}/^{39}\text{Ar}$ dating and data on trace elements of igneous and mineralized rocks. *Zolotoe orudenenie i granitoidnyi magmatizm Severnoi Patsifikii: sb. tr. Vseros. soveshch. = Gold mineralization and granitoid magmatism of North Pacific: collection of proceedings of the All-Russian conference*. 4–6 September 1997, Magadan. Magadan; 2000, vol. 1, p. 181-205. (In Russ.).

9. Akinin V.V., Alshevsky A.V., Polzunenkov G.O., Sergeev S.A., Sidorov V.A. Age of Natalka orogenic gold deposit (U-Pb, $^{40}\text{Ar}/^{39}\text{Ar}$, Re-Os constrain). *Tikhookeanskaya Geologiya*. 2023;42(6):62-79. (In Russ.). <https://doi.org/10.30911/0207-4028-2023-42-6-62-79>. EDN: SGJBWY.

10. Goncharov V.I., Voroshin S.V., Sidorov V.A. *Natalka gold deposit*. Magadan: North-Eastern Interdisciplinary Scientific Research Institute; 2002, 250 p. (In Russ.).

11. Goryachev N.A., Golub V.V., Vikent'eva O.V., Bortnikov N.S., Prokof'ev V.Yu., Alpatov V.A. The world-class Natalka gold deposit, Northeast Russia: REE patterns, fluid inclusions, stable oxygen isotopes, and formation conditions of ore. *Geologiya rudnykh mestorozhdenii*. 2008;50(5):414-444. (In Russ.). EDN: JSJRSX.

12. Layer P.W., Newberry R.J., Fujita K., Parfenov L.M., Trunilina V., Bakharev A. Tectonic setting of the plutonic belts of Yakutia, northeast Russia, based on $^{40}\text{Ar}/^{39}\text{Ar}$ geochronology and trace element geochemistry. *Geology*. 2001;29(2):167-170. [https://doi.org/10.1130/0091-7613\(2001\)029<0167:TSOTPB>2.0.CO;2](https://doi.org/10.1130/0091-7613(2001)029<0167:TSOTPB>2.0.CO;2).

13. Chernyshev I.V., Bortnikov N.S., Goltsman Y.V., Gamyanin G.N., Chugaev A.V., Bairova E.D., et al. Geochronology of igneous rocks at and near to the Nezhdaninka gold deposit, Yakutia, Russia: U-Pb, Rb-Sr, and Sm-Nd isotopic data. *Geologiya rudnykh mestorozhdenii*. 2012;54(6):487-512. (In Russ.). EDN: PNQPAZ.

14. Prokof'ev A.V., Borisenko A.S., Gamyanin G.N., Fridovskii V.Yu., Kondrat'eva L.A., Anisimova G.S., et al. Age constraints and tectonic settings of metallogenic and magmatic events in the Verkhoyansk-Kolyma folded area. *Geologiya i geofizika*.



2018;59(10):1542-1563. (In Russ.). <https://doi.org/10.15372/GiG20181004>. EDN: YLSPTF.

15. Chugaev A.V., Chernyshov I.V., Gamyranin G.N., Bortnikov N.S., Baranova A.N. Rb-Sr isotopic systematic of hydrothermal minerals, age, and matter sources of the Nezhdaninskoe gold deposit (Yakutia). *Doklady Akademii nauk*. 2010;434(4):534-539. (In Russ.). EDN: NBSZUH.

16. Bortnikov N.S., Vikent'eva O.V., Prokof'ev V.Yu., Gamyranin G.N., Alpatov V.A., Bakharev A.G. Fluid composition and origin in the hydrothermal system of the Nezhdaninsky gold deposit, Sakha (Yakutia), Russia. *Geologiya rudnykh mestorozhdenii*. 2007;49(2):99-145. (In Russ.). EDN: HZRSZH.

17. Chernyshev I.V., Bortnikov N.S., Chugaev A.V., Gamyranin G.N., Bakharev A.G. Metal sources of the large Nezhdaninsky orogenic gold deposit, Yakutia, Russia: results of high-precision MC-ICP-MS analysis of lead isotopic composition supplemented by data on strontium isotopes. *Geologiya rudnykh mestorozhdenii*. 2011;53(5):395-418. (In Russ.). EDN: OJGRCL.

18. Budyak A.E., Goryachev N.A., Skuzovatov S.Y. Geodynamic background for large-scale mineralization in the southern environs of the Siberian craton in the proterozoic. *Doklady Akademii nauk*. 2016;470(5):562-565. (In Russ.). <https://doi.org/10.7868/S0869565216290181>. EDN: WLNNIH.

19. Budyak A.E., Skuzovatov S.Y., Tarasova Y.I., Goryachev N.A., Wang K.L. Common neoproterozoic–early paleozoic evolution of ore-bearing sedimentary complexes in the southern Siberian craton. *Doklady Akademii nauk*. 2019;484(3):335-339. (In Russ.). <https://doi.org/10.31857/S0869-5652484335-339>. EDN: MIMDQW.

20. Khudolei A.K., Gur'ev G.A. Southern Verkhoyansk area as an example of a Middle Paleozoic-Mesozoic passive margin. *Doklady Akademii nauk*. 1998;362(5):666-669. (In Russ.).

21. Nemerov V.K., Razvozhayeva E.A., Budyak A.E., Stanevich A.M., Kornilova T.A. Biogenic sedimentation factors of mineralization in the Neoproterozoic strata of the Baikal-Patom region. *Geologiya i geofizika*. 2010;51(5):729-747. (In Russ.). EDN: MKTVOD.

22. Parshin A., Bashkeev A., Davidenko Y., Persova M., Iakovlev S., Bukhalov S., et al. Lightweight unmanned aerial system for time-domain electromagnetic prospecting – the next stage in applied UAV-geophysics. *Applied Sciences (Switzerland)*. 2021;11:2060. <https://doi.org/10.13140/RG.2.2.21200.23042>.

23. Kokin A.V. New data on the gold content of sedimentary rocks of the southeastern frame of the Siberian Platform. *Doklady Akademii nauk*. 1990;313(3):697-699. (In Russ.).

24. Vedernikov I.L. Distribution of organic carbon in Permian gold-bearing strata of the Ayan-Yuryakh anticlinorium. In: *Chteniya pamyati akademika K.V. Simakova: tez. dokl. Vseros. nauch. konf. = Readings in memory of the Academician K.V. Simakov: report abstracts of the All-Russian scientific conference*. 25–27 November 2009, Magadan. Magadan; 2009, p. 43-44. (In Russ.). EDN: TBNZVP.

25. Mikhailitsyna T.I. Lithology and geochemistry of the upper permian rocks of the Ayan-Yuryakh anticlinorium (case of the Tikhonya creek section, Magadan oblast). *Vestnik Severo-Vostochnogo nauchnogo tsentra DVO RAN = Bulletin of the North-East Scientific Center, Russia Academy of Sciences Far East Branch*. 2014;4:17-28. (In Russ.). EDN: THKYXV.

26. Ivanov A.I. *Gold of Baikal-Patom (geology, mineralization, prospects)*. Moscow: Central Research Institute of Geological Prospecting for Base and Precious Metals; 2014, 215 p. (In Russ.). EDN: ZOIMFF.

27. Blinov A.V., Parshin A.V., Kosterev A.N. Features of geophysical methods for gold and uranium deposits prospecting in mountain regions of Northern Transbaikalia. *Izvestiya Sibirskogo otdeleniya seksii nauk o Zemle Rossiiskoi akademii estestvennykh nauk. Geologiya, poiski i razvedka rudnykh mestorozhdenii = Proceedings of the Siberian Department of the Section of Earth Sciences of the Russian Academy of Natural Sciences. Geology, Prospecting and Exploration of Ore Deposits*. 2014;1:55-60. (In Russ.). EDN: UMIVTT.

28. Parshin A.V., Budyak A.E., Blinov A.V., Kosterev A.N., Morozov V.A., Mikhalev A.O., et al. Low-altitude unmanned aeromagnetic survey in management of large-scale structuralgeological mapping and prospecting for ore deposits in composite topography. Part 2. *Geografiya i prirodnye resursy = Geography and Natural Resources*. 2016;56:150-155. (In Russ.). [https://doi.org/10.21782/GIPR0206-1619-2016-6\(150-155\)](https://doi.org/10.21782/GIPR0206-1619-2016-6(150-155)). EDN: XQRZBR.

29. Babyak V.N., Blinov A.V., Tarasova Ju.I., Budyak A.E. New data on the geological and structural features of the Ozhereliye, Ykanskoie, Ugahan and Golets Vysochaishy gold fields. *Nauki o Zemle i nedropol'zovanie = Earth sciences and subsoil use*. 2019;42(4):388-412. (In Russ.). <https://doi.org/10.21285/2686-9993-2019-42-4-388-412>. EDN: UWHZEJ.

30. Blinov A.V., Tarasova Ju.I. Mineralogical and petrographic characteristics of the Ugahan deposit. *Nauki o Zemle i nedropol'zovanie = Earth sciences and subsoil use*. 2020;43(2):160-176. (In Russ.). <https://doi.org/10.21285/2686-9993-2020-43-2-160-176>. EDN: URLQFK.

31. Zorin Yu.A., Mazukabzov A.M., Gladkochub D.P., Donskaya T.V., Presnyakov S.L., Sergeev S.A. Silurian age of major folding in riphean deposits of the Baikal-Patom zone. *Doklady Akademii nauk*. 2008;423(2):228-233. (In Russ.). EDN: JTXFAD.

32. Goryachev N.A. *Origin of gold quartz vein belts throughout the Northern Pacific area*. Magadan: North-Eastern Integrated Research Institute; 2003, 143 p. (In Russ.). EDN: QKEBMV.



33. Goryachev N.A., Sotskaya O.T., Goryachev I.N., Mikhailitsyna T.I. Mineralogical and geochemical features of the early cretaceous gold ore mineralization of the eastern flank of Yana-Kolyma orogenic belt (Magadan region, Russia). *Tikhookeanskaya Geologiya*. 2023;42(6):80-95. (In Russ.). <https://doi.org/10.30911/0207-4028-2023-42-6-80-95>. EDN: LVMTTG.
34. Goryachev N.A., Pirajno F. Gold deposits and gold metallogeny of Far East Russia. *Ore Geology Reviews*. 2014;59:123-151. <https://doi.org/10.1016/j.oregeorev.2013.11.010>.
35. Goldfarb R.J., Taylor R.D., Collins G., Goryachev N.A., Orlandini O. Phanerozoic continental growth and gold metallogeny of Asia. *Gondwana Research*. 2014;25(1):49-102. <https://doi.org/10.1016/j.gr.2013.03.002>.
36. Fridovsky V.Y., Kudrin M.V., Goryachev N.A., Krymsky R.S., Belyatsky B.V., Sergeev S.A. The age of gold mineralization in the Yana-Kolyma metallogenic belt, Northeastern Russia: first data of Re-Os isotope geochronology of native gold. *Tikhookeanskaya Geologiya*. 2021;40(4):18-32. (In Russ.). <https://doi.org/10.30911/0207-4028-2021-40-4-18-32>. EDN: HLDPRX.
37. Akinin V.V., Prokopiev A.V., Toro J., Miller E.L., Wooden J., Goryachev N.A., et al. U-Pb SHRIMP ages of granitoides from the Main batholith belt (North East Asia). *Doklady Akademii nauk*. 2009;426(2):216-221. (In Russ.). <https://doi.org/10.1134/S1028334X09040217>. EDN: KAVTCR.
38. Tarasova Yu.I., Budyak A.E., Ivanov A.V., Goryachev N.A., Ignatiev A.V., Velivetskaya T.A., et al. Indicator and isotope geochemical characteristics of iron sulfides from the Golets Vysochaishy deposit, East Siberia. *Geology of Ore Deposits*. 2022;64(7):503-512. <https://doi.org/10.1134/S1075701522070108>.
39. Tarasova Y.I., Budyak A.E., Goryachev N.A., Blinov A.V., Goryacheva E.M., Ignatiev A.V., et al. Typomorphism of pyrite from the Ugakhan gold deposit (Baikal-Patom highlands). *Doklady Rossiiskoi akademii nauk. Nauki o Zemle*. 2022;503(1):12-17. (In Russ.). <https://doi.org/10.31857/S2686739722030136>. EDN: EOJDKO.
40. Goryachev N.A., Mishunin V.I., Goryacheva E.M., Sotskaya O.T., Tarasova YU.I., Budyak A.E. Sulfide thermo-EMF: method capabilities and significance for mineralogical research (exemplified by the study of pyrite and arsenopyrite gold deposits in the eastern and southern margins of the Siberian craton). *Vestnik Severo-Vostochnogo nauchnogo tsentra DVO RAN = Bulletin of the North-East Scientific Center, Russia Academy of Sciences Far East Branch*. 2022;3:41-55. (In Russ.). <https://doi.org/10.34078/1814-0998-2022-3-41-55>. EDN: KBDJHF.
41. Sotskaya O.T., Semyshev F.I., Malinovsky M.A., Al'shevsky A.V., Livach A.E., Goryachev N.A. Pyrite from sulfidization zones of terrigenous complexes in the Yana-Kolyma orogenic belt (North-East Russia): generations, typochemistry, mineral associations. *Vestnik Severo-Vostochnogo nauchnogo tsentra DVO RAN = Bulletin of the North-East Scientific Center, Russia Academy of Sciences Far East Branch*. 2022;1:14-30. (In Russ.). <https://doi.org/10.34078/1814-0998-2022-1-14-30>. EDN: QFRYIL.
42. Tarasova Yu.I., Budyak A.E. Formation stages of the Kholodninskoye pyrite-polymetallic deposit ore zone. *Nauki o Zemle i nedropol'zovanie = Earth sciences and subsoil use*. 2023;46(2):201-211. (In Russ.). <https://doi.org/10.21285/2686-9993-2023-46-2-201-211>. EDN: RANYSC.
43. Kokin A.V. Arsenic South Verkhoyansk province. *Geologiya i geofizika*. 1985;26(1):74-81. (In Russ.).
44. Goryachev I.N. Mineral prospectivity mapping for forecasting gold deposits in the Central Kolyma region (Magadan region, Russia). *Geoinformatika*. 2023;1:4-17. (In Russ.). <https://doi.org/10.47148/1609-364X-2023-1-4-17>. EDN: RJRSJL.

Информация об авторах / Information about the authors



Горячев Николай Анатольевич,
академик РАН,
доктор геолого-минералогических наук, профессор,
главный научный сотрудник лаборатории петрологии,
изотопной геохронологии и рудогенеза,
Северо-Восточный комплексный научно-исследовательский
институт им. Н.А. Шило ДВО РАН,
г. Магадан, Россия,
главный научный сотрудник лаборатории геохимии рудообразования
и геохимических методов поисков,
Институт геохимии им. А.П. Виноградова СО РАН,
г. Иркутск, Россия,
goryachev@neisri.ru
<https://orcid.org/0000-0002-2745-9167>
Nikolay A. Goryachev,
Academician of the Russian Academy of Sciences,
Dr. Sci. (Geol. & Mineral.), Professor,
Chief Researcher of the Laboratory of Petrology,
Isotope Geochronology and Ore Genesis,

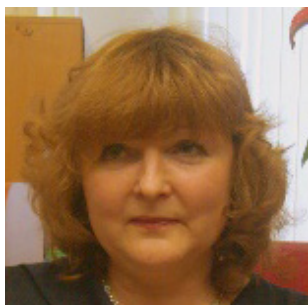


North-East Interdisciplinary Scientific Research Institute
named after N.A. Shilo FEB RAS,
Magadan, Russia,
Chief Researcher of the Laboratory of Ore Formation Geochemistry
and Geochemical Exploration Methods,
A.P. Vinogradov Institute of Geochemistry SB RAS,
Irkutsk, Russia,
goryachev@neisri.ru
<https://orcid.org/0000-0002-2745-9167>



Будяк Александр Евгеньевич,
кандидат геолого-минералогических наук, доцент,
руководитель департамента рудной геологии,
институт «Сибирская школа геонаук»,
Иркутский национальный исследовательский технический университет,
г. Иркутск, Россия,
заместитель директора по научной работе,
Институт геохимии им. А.П. Виноградова СО РАН,
г. Иркутск, Россия,
budyak@igc.irk.ru
<https://orcid.org/0000-0003-0814-2583>

Alexander E. Budyak,
Cand. Sci. (Geol. & Mineral.), Associate Professor,
Head of the Department of Ore Geology,
Siberian School of Geosciences,
Irkutsk National Research Technical University,
Irkutsk, Russia,
Deputy Director for Research,
A.P. Vinogradov Institute of Geochemistry SB RAS,
Irkutsk, Russia,
budyak@igc.irk.ru
<https://orcid.org/0000-0003-0814-2583>



Михалицына Татьяна Ивановна,
кандидат геолого-минералогических наук,
старший научный сотрудник лаборатории петрологии,
изотопной геохронологии и рудогенеза,
Северо-Восточный комплексный научно-исследовательский
институт им. Н.А. Шило ДВО РАН,
г. Магадан, Россия,
tim_66@mail.ru
<https://orcid.org/0000-0002-8668-7805>

Tatiana I. Mikhaliitsyna,
Cand. Sci. (Geol. & Mineral.),
Senior Researcher of the Laboratory of Petrology,
Isotope Geochronology and Ore Genesis,
North-East Interdisciplinary Scientific Research Institute
named after N.A. Shilo FEB RAS,
Magadan, Russia,
tim_66@mail.ru
<https://orcid.org/0000-0002-8668-7805>



Тарасова Юлия Игоревна,
кандидат геолого-минералогических наук,
старший научный сотрудник департамента рудной геологии,
институт «Сибирская школа геонаук»,
Иркутский национальный исследовательский технический университет,
г. Иркутск, Россия,
старший научный сотрудник лаборатории геохимии рудообразования
и геохимических методов поисков,
Институт геохимии СО РАН,
г. Иркутск, Россия,
✉ j.tarasova84@yandex.ru
<https://orcid.org/0000-0001-8741-9645>



Yulia I. Tarasova,

Cand. Sci. (Geol. & Mineral.),
Senior Researcher of the Department of Ore Geology,
Siberian School of Geosciences,
Irkutsk National Research Technical University,
Irkutsk, Russia,
Senior Researcher of the Laboratory of Ore Formation Geochemistry
and Geochemical Exploration Methods,
Vinogradov Institute of Geochemistry SB RAS,
Irkutsk, Russia,
✉ j.tarasova84@yandex.ru
<https://orcid.org/0000-0001-8741-9645>

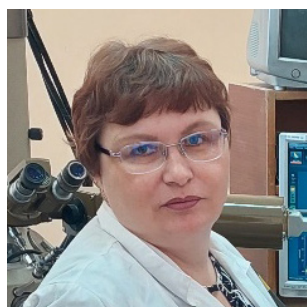


Горячев Иван Николаевич,

научный сотрудник департамента рудной геологии,
институт «Сибирская школа геонаук»,
Иркутский национальный исследовательский технический университет,
г. Иркутск, Россия,
ivan.goryachev@geo.istu.edu
<https://orcid.org/0000-0002-5250-9410>

Ivan N. Goryachev,

Researcher of the Ore Geology Department,
Siberian School of Geosciences,
Irkutsk National Research Technical University,
Irkutsk, Russia,
ivan.goryachev@geo.istu.edu
<https://orcid.org/0000-0002-5250-9410>



Соцкая Ольга Тарасовна,

кандидат геолого-минералогических наук,
научный сотрудник лаборатории петрологии,
изотопной геохронологии и рудогенеза,
Северо-Восточный комплексный научно-исследовательский
институт им. Н.А. Шило ДВО РАН,
г. Магадан, Россия,
sotskaya@neisri.ru
<https://orcid.org/0000-0003-3240-8927>

Olga T. Sotskaya,

Cand. Sci. (Geol. & Mineral.),
Researcher of the Laboratory of Petrology,
Isotope Geochronology and Ore Genesis,
North-East Interdisciplinary Scientific Research Institute
named after N.A. Shilo FEB RAS,
Magadan, Russia,
sotskaya@neisri.ru
<https://orcid.org/0000-0003-3240-8927>

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 25.09.2023; одобрена после рецензирования 19.10.2023; принята к публикации 29.11.2023.

The article was submitted 25.09.2023; approved after reviewing 19.10.2023; accepted for publication 29.11.2023.

ГЕОЛОГИЯ, ПОИСКИ И РАЗВЕДКА ТВЕРДЫХ
ПОЛЕЗНЫХ ИСКОПАЕМЫХ, МИНЕРАГЕНИЯ

Научная статья

УДК 543.427.4

EDN: XMHYIB

DOI: 10.21285/2686-9993-2023-46-4-390-401

**Экспрессный рентгенофлуоресцентный анализ
как современная альтернатива традиционным спектральным
методам при решении задач геохимических поисков****О.В. Кузнецова^{a✉}, О.Л. Качор^b, И.А. Матюхин^c, З.Л. Икрамов^d, А.В. Паршин^e**^{a-e}*Иркутский национальный исследовательский технический университет, г. Иркутск, Россия*^e*Институт геохимии им. А.П. Виноградова СО РАН, г. Иркутск, Россия*

Резюме. Цель данного исследования заключалась в представлении результатов исследования возможностей современных портативных экспрессных рентгенофлуоресцентных анализаторов при решении задач геолого-геохимических поисков. На примере использования анализатора SciAps X200 были изучены метрологические показатели для результатов анализа портативными приборами. В работе показаны результаты оценки точности аналитических исследований по государственным стандартным образцам. Воспроизводимость результатов анализа рассчитана на основе проб с перспективных на золото участков Бодайбинского синклиория. Доказано, что точность метода находится на высоком уровне, погрешности измерений во многих случаях кратно ниже допустимых аттестованных значений. Показано, что воспроизводимость составила 0,5–20 % в зависимости от элемента, что в большинстве случаев существенно ниже, чем допускает методика анализа. Представлены результаты межлабораторных сравнительных испытаний, подтверждающие сопоставимость аналитических результатов стационарных и портативных рентгенофлуоресцентных анализаторов. Для ряда значимых элементов авторами обосновано отсутствие необходимости в уточнении результатов полевого экспрессного рентгенофлуоресцентного анализа с помощью трудоемких и затратных методов с кислотным разложением – атомно-эмиссионной и атомно-абсорбционной спектроскопии. Доказано, что внедрение портативного экспрессного оборудования в практику геолого-поисковых работ позволит проводить аналитические исследования «на месте» в режиме реального времени.

Ключевые слова: рентгенофлуоресцентные методы анализа, портативные аналитические приборы, геохимический поиск, химический анализ

Для цитирования: Кузнецова О.В., Качор О.Л., Матюхин И.А., Икрамов З.Л., Паршин А.В. Экспрессный рентгенофлуоресцентный анализ как современная альтернатива традиционным спектральным методам при решении задач геохимических поисков // Науки о Земле и недропользование. 2023. Т. 46. № 4. С. 390–401. <https://doi.org/10.21285/2686-9993-2023-46-4-390-401>. EDN: XMHYIB.

GEOLOGY, PROSPECTING AND EXPLORATION
OF SOLID MINERALS, MINERAGENCY

Original article

**Rapid X-ray fluorescence analysis as a modern alternative to traditional
spectral methods in geochemical prospecting****Olga V. Kuznetsova^{a✉}, Olga L. Kachor^b, Igor A. Matyuhin^c,
Ziyoviddin L. Ikramov^d, Alexander V. Parshin^e**^{a-e}*Irkutsk National Research Technical University, Irkutsk, Russia*^e*A.P. Vinogradov Institute of Geochemistry SB RAS, Irkutsk, Russia*

Abstract. The purpose of the study is to present the research results of the capabilities of modern portable rapid X-ray fluorescence analyzers when solving problems of geological and geochemical prospecting. On example of the applied SciAps

© Кузнецова О.В., Качор О.Л., Матюхин И.А., Икрамов З.Л., Паршин А.В., 2023



X200 analyzer, the metrological indicators for the analysis results by portable instruments have been studied. The accuracy assessment results of analytical studies according to state standard reference samples are shown. Reproducibility of the analysis results is calculated on the basis of samples from promising gold sites of the Bodaibo synclinorium. The method is proved to be of high precision, and measurement errors in many cases are many times lower than the permissible certified values. The reproducibility is shown as 0,5–20 % depending on the element, which in most cases is significantly lower than the methodology permits. The results of interlaboratory comparative tests confirming the comparability of the analytical results of stationary and portable X-ray fluorescence analyzers are presented. For a number of significant elements, the authors have substantiated the lack of need to refine the results of the field rapid X-ray fluorescence analysis using labor-intensive and expensive methods with acid decomposition - atomic emission and atomic absorption spectroscopy. It has been proved that introduction of portable express equipment into geological prospecting works will make it possible to conduct real-time "on site" analytical studies.

Keywords: X-ray fluorescence analysis methods, portable analytical instruments, geochemical prospecting, chemical analysis

For citation: Kuznetsova O.V., Kachor O.L., Matyuhin I.A., Ikramov Z.L., Parshin A.V. Rapid X-ray fluorescence analysis as a modern alternative to traditional spectral methods in geochemical prospecting. *Nauki o Zemle i nedropol'zovanie = Earth sciences and subsoil use*. 2023;46(4):390-401. (In Russ.). <https://doi.org/10.21285/2686-9993-2023-46-4-390-401>. EDN: XMXIYB.

Введение

Решение геолого-поисковых задач в большинстве случаев требует определения химического состава горных пород, руд и минералов. В современной практике для этого наиболее часто используются спектральные методы анализа, такие как атомно-абсорбционный анализ, атомно-эмиссионный анализ с индуктивно связанной плазмой, масс-спектрометрия с индуктивно связанной плазмой [1–4]. Эти методы позволяют выявлять любые значимые аномалии содержаний химических элементов относительно фоновых значений и таким образом решать задачи геохимических поисков. В рамках подобных работ производится отбор и анализ тысяч и десятков тысяч проб с одного участка, что крайне трудоемко и продолжительно: после завершения полевых работ, которые обычно проводятся на участках, удаленных от транспортной инфраструктуры, весь отобранный материал требуется сперва доставить в лабораторию, в которой будет произведено предварительное разложение с целью перевода определяемых компонентов в раствор, а затем с применением спектральных методов анализа будет получен аналитический результат. Доставка проб в лабораторию может занимать недели, операции пробоподготовки и анализа занимают до суток на партию проб (20–50 шт.). Таким образом, результат химико-аналитических работ станет доступен для интерпретации гораздо позже завершения полевого сезона. Это автоматически продлевает геологический проект на следующий год, что весьма нежелательно в современных условиях, а принимать оперативные решения на основе получаемых данных, гибко менять план работ не получится. Следует от-

метить и неблагоприятные факторы, влияющие на качество результата – от потери проб при доставке до возможного вклада случайных погрешностей во время перевода пробы из твердого состояния в раствор, кроме того, существует вероятность потерь определяемых элементов при термическом озолении материала проб.

В этих условиях более перспективен метод неdestructивного рентгенофлуоресцентного анализа (РФА), который позволяет за несколько минут определять содержание 20–50 элементов в пробе и минимизировать возможную ошибку оператора при пробоподготовке, так как вся традиционная пробоподготовка при РФА сводится к ситовке, истиранию исследуемого материала и последующему прессованию «таблетки». Несмотря на очевидные преимущества, использование данного метода при решении задач геохимических поисков ограничено. Это обусловлено необходимостью использования для градуировки государственных стандартных образцов (ГСО) состава или образцов с установленным опорным значением состава, идентичных исследуемым пробам [5], а также влиянием распространенного в отрасли мнения о полуколичественном уровне измерений РФА, в связи с чем он не рассматривается как возможный аналог высокоточных методов. Вторая проблема в значительной степени обусловлена первой, так как выбор ГСО ограничен имеющимися в стране аттестованными образцами [6], а наборы эталонных коллекций не находятся в открытом доступе, что резко ограничивает возможность качественной градуировки и калибровки под конкретные задачи и действительно сильно снижает качество результатов [7, 8]. Кроме того, предыдущие поколения



химико-аналитической аппаратуры, а также часто применяемые для экспрессного анализа горных пород и руд портативные анализаторы, предназначенные для задач, отличных от геохимических (анализ сплавов, разбавка металлолома и т. д.), зачастую не обеспечивали необходимой чувствительности в отношении нижних пределов обнаружения значимых элементов – даже в случае наличия ГСО.

Тем не менее развитие приборно-аналитической базы в последние годы привнесло несомненные дополнительные плюсы в применение метода РФА [9]. Одним из главных преимуществ рентгенофлуоресцентных методов стало появление портативных экспрессных РФА-анализаторов с детекторами высокого напряжения (до 50–55 кВ), что существенно выше, даже чем у стационарной аппаратуры прошлых поколений, и зачастую обеспечивает большую информативность, чем повышение мощности трубок. Постепенное внедрение такого оборудования в практику геолого-поисковых работ дает проводить аналитические исследования «на месте» в режиме реального времени, что позволяет оперативно реагировать на изменения в химическом составе материалов и принимать соответствующие решения без дорогостоящего вывоза большого объема проб в лабораторию. Такой анализ не требует сложной пробоподготовки и изготовления «таблеток», как для стационарных лабораторных приборов РФА, измерение одной пробы на содержание 20–50 элементов проводится в течение нескольких минут.

В данной работе на примере ряда цветных и благородных металлов мы хотим показать, что чувствительность современной аппара-

туры для РФА в совокупности с правильными калибровками позволяет обнаруживать элементы в количествах, достаточных для успешного решения задач геологических поисков. Таким образом, целью исследования является формирование базиса в опровержение представлений о предварительном полуколичественном характере экспрессного полевого РФА-анализатора и того, что он требует дальнейшего уточнения традиционными спектральными методами в стационарной лаборатории.

Материалы и методы исследования

Исследования проводились в химико-аналитической лаборатории института «Сибирская школа геонаук» Иркутского национального исследовательского технического университета. Использовался портативный РФА-анализатор SciAps X200 «Геохимия» (рентгеновская трубка с золотым анодом с максимальным напряжением 50 кВ, полупроводниковый SSD-детектор) (рисунок). Паспортные данные по пределам обнаружения приведены в табл. 1. Следует отметить, что данный анализатор относится к позапрошлому поколению РФА-анализаторов данного производителя, заметно уступая наиболее современной аппаратуре как по мощности, так и по напряжению детектора. Таким образом, в исследовании применялось доступное по цене и далеко не уникальное по характеристикам оборудование, обладающее при этом необходимыми, по нашему мнению, ключевыми характеристиками – достаточно высоким напряжением трубки и возможностью самостоятельной калибровки.



*Рентгенофлуоресцентный анализатор SciAps X200
SciAps X200 X-ray fluorescence analyzer*





Таблица 1. Пределы обнаружения элементов для анализатора SciAps X200, мг/кг
Table 1. Element detection limits for the SciAps X200 analyzer, mg/kg

Элемент	Ag	Cd	Sn	Sb	Ba	P	K	Ca	W	Hg	Pb
Предел обнаружения	2	2	4	5	18	500	50	50	12	3	3
Элемент	Ti	V	Cr	Mn	Fe	Co	Ni	Cu	Zn	As	Mo
Предел обнаружения	10	5	10	15	8	30	5	5	3	3	2

Как видно из табл. 1, нижний предел обнаружения по основным элементам не превышает их кларковых значений [10, 11]. Это потенциально позволяет выявлять значимые отклонения содержаний элементов в земной коре, однако напрямую не свидетельствует о применимости на конкретном участке или в регионе. Кроме того, геолого-поисковые задачи, в отличие от, например, экологических, требуют не столько выдачи протоколов химического анализа в соответствии с заданными государственными стандартами, санитарно-эпидемиологическими правилами и нормами или иными нормативными документами и диапазонами измерений, сколько понимания реальных возможностей аппаратуры и методики в отношении возможностей определения диапазонов реальной чувствительности. Для этого необходимо произвести исследование пределов определения элементов и оценки динамического диапазона определяемых содержаний [12] в сопоставлении с реальным геохимическим фоном объекта или региона – юга Сибирского кратона [13, 14]. В данном случае объектами исследования являлись пробы с участков Бодайбинского синклинория – одного из наиболее перспективных на рудное золото районов России, потенциал которого на обнаружение новых объектов еще далеко не исчерпан [13–15], что и определяет выбор данных проб для настоящего исследования. Рядовые пробы относились к одному из двух основных рудоперспективных стратиграфических подразделений

[16, 17] – аунакитской свите (пробы Au-40-18 и др.). Исследуемые пробы были отобраны в рамках обычных коммерческих геолого-поисковых работ и отситованы и истерты по стандартной методике. Для калибровки применялись эталонные коллекции с аунакитской свиты и государственные стандартные образцы почв.

Для установления возможности применения РФА-анализатора SciAps X200 в высокоточных аналитических работах необходимо в соответствии с ГОСТ Р ИСО 5725-1-2002¹ оценить точность выполнения измерений в соответствии со стандартизированной процедурой. Расчеты точности и воспроизводимости результатов проведены по РМГ 61-2003².

Результаты исследования и их обсуждение

В первую очередь произведена оценка точности РФА с помощью стандартных образцов почв: СЛг-1 (стандартный образец состава сланца черного); СЧС-1 (стандартный образец состава сланца черного); СГХМ-3 (стандартный образец состава карбонатно-силикатных рыхлых отложений); СГХМ-4 (стандартный образец состава алюмосиликатных рыхлых отложений). Сопоставление результатов РФА образцов почв, полученных на основании серии из 15 измерений, и аттестованных значений для некоторых элементов, приведенных в паспортах на стандартные образцы, представлены в табл. 2.

¹ ГОСТ Р ИСО 5725-1-2002. Точность (правильность и прецизионность) методов и результатов измерений. М.: Стандартинформ, 2009. 22 с.

² РМГ 61-2003. Показатели точности, правильности, прецизионности методик количественного химического анализа. Методы оценки. М.: Стандартинформ, 2007. 45 с.



Таблица 2. Оценка точности результатов рентгенофлуоресцентного анализа с помощью стандартных образцов состава почв
Table 2. Accuracy evaluation of X-ray fluorescence analysis results using the reference samples of soil composition

Элемент	Содержание, мг/кг							
	СГХМ-3		СГХМ-4		СЧС-1		СЛг-1	
	Паспорт	Показания РФА	Паспорт	Показания РФА	Паспорт	Показания РФА	Паспорт	Показания РФА
As	90*	87±9	7000*	7220±114	40±7	51±6	46±8	46±4
Ba	350±60	387±37	390±60	384±35	720±120	714±42	376±46	397±35
Cu	260±20	258±15	250±30	278±16	34±6	29±8	39±7	31±7
Fe	74130±1400	75149±997	36680±490	37089±572	38990±840	39284±628	52290±1190	53161±663
Mn	3873±232	4121±124	852±77	903±57	442±47	471±50	852±62	903±54
Ni	19±3	20±9	25±2	32±11	39±6	45±10	50±7	60±12
Pb	200*	196±8	110±10	122±8	8,2±1,4	11±3	14±3	16±3
Rb	40±1	44±2	190±30	212±5	140±10	155±5	112±11	121±5
Sn	4±1	8±4	400±100	446±15	2,2±0,4	Н. о.	3,2*	5±2
Sr	180±20	176±4	200±30	185±4	150±15	160±4	142±15	145±4
Zn	140±10	134±9	390±40	410±17	96±11	104±9	97±13	92±7

Примечание. * – в паспорте государственных стандартных образцов отсутствуют сведения о погрешности аттестованного значения. Н. о. – не обнаружено

Как видно из данных табл. 2, результаты РФА достигают высокой точности, не уступающей зарекомендовавшим себя спектральным методам, а зачастую превосходящей их, в частности атомно-эмиссионный анализ с индуктивно связанной плазмой [18, 19].

На эталонных коллекциях проб аунакитской свиты были уточнены калибровочные графики РФА-анализатора. Дальнейшее определение химического состава проб Бодайбинского рудного узла по схеме дисперсионного анализа позволило определить погрешности,

характеризующие воспроизводимость результатов анализа. Данные по некоторым элементам, рассчитанные по результатам анализа 18 проб, представлены в табл. 3.

Как видно из данных табл. 3, воспроизводимость составила 0,5–20 % в зависимости от элемента, что в большинстве случаев кратно ниже, чем допускает методика анализа. Следует обратить особое внимание на достижение реальной чувствительности по мышьяку, который зачастую выступает ключевым спутником золота, до 3 мг/кг, что втрое превышает возмож-

Таблица 3. Воспроизводимость результатов рентгенофлуоресцентного анализа
Table 3. Reproducibility of X-ray fluorescence analysis results

Определяемый компонент	Диапазоны содержания компонента в изученных пробах, мг/кг	Рассчитанная воспроизводимость для данного диапазона концентраций, %	Допустимая методикой воспроизводимость для данного диапазона концентраций, %
Ba	250–1000	4	20
Ti	2000–7000	1	20
Cr	50–110	5	20
Mn	60–600	8	20
Fe	15000–80000	0,5	10
Ni	10–40	14	20
Cu	10–50	12	20
Zn	20–80	5	20
As	3–25	11	20
Mo	2–40	20	20
Pb	10–50	7	20
K	5000–25000	1	10
Ca	500–2500	4	10



ности методики по ГОСТ 33850-2016³. Это важно, так как фоновые концентрации мышьяка в стратиграфических подразделениях изучаемого региона составляют от 7–8 мг/кг (для бужуйтинской свиты), что делает метрологию анализа на уровне государственного стандарта неудовлетворительной и ставит вопрос об уточнении результатов РФА методами эмиссионной и абсорбционной спектрометрии. Вывод о достаточной чувствительности правильно выполненного РФА подтверждается при сопоставлении данных из табл. 2 и 3 с литературными данными по концентрациям и других элементов (бария, никеля, меди, цинка и др.) в породах исследуемого региона [13, 15, 16]. Например, согласно источнику [13], изменчивость концентраций таких металлов, как медь, никель, свинец, в породах Северного Забайкалья находится на уровне 0,4–5 по сравнению с содержаниями элементов в образце СЧС-1, и в случае каждого из исследуемых элементов удастся надежно определять значения концентраций элементов от уровня «ниже фона» до околорудных концентраций с высокой воспроизводимостью и высокой точностью, что исключает необходимость дополнительного применения методов с кислотным разложением. Допустимо отметить, что даже прецизионно выполненная атомно-эмиссионная спектроскопия [20] может обеспечивать сходные погрешности определения металлов в горных породах, не говоря уже о рутинном анализе тысяч проб при выполнении производственных работ.

Далее было произведено сравнение качества результатов, получаемых на портативном РФА-анализаторе SciAps X200 и стационарных рентгеновских спектрометрах Bruker S4 Pioneer в аккредитованной в установленном порядке лаборатории рентгеновских методов анализа Института геохимии им. А.П. Виноградова СО РАН в рамках межлабораторных сличительных испытаний. Для этого обе лаборатории получили четыре рабочие пробы со стабильным известным содержанием элементов (исполнителям в обеих лабораториях приписное значение определяемых компонентов до конца эксперимента оставалось неизвестным). Обеими лабораториями использовались разные норматив-

ные документы на выполнение анализа, а также различные средства измерения. Так, химико-аналитическая лаборатория института «Сибирская школа геонаук» Иркутского национального исследовательского технического университета использовала ГОСТ 33850-2016³. Лаборатория рентгеновских методов анализа Института геохимии им. А.П. Виноградова СО РАН работала по СТП ИГХ-022-2010⁴. Средствами измерений выступали упомянутые выше спектрометры SciAps X200 и Bruker S4 соответственно. Результаты испытаний приведены в табл. 4.

В табл. 4 заключение дано в соответствии с ГОСТ ISO/IEC 17043-2013⁵ путем сравнения величин Z -индекса и Z -индекса с установленными нормативами контроля.

Z -индекс рассчитывается по формуле

$$Z = \frac{x - X}{\sigma},$$

где x – результат испытания; X – приписное значение; σ – стандартное отклонение оценки компетентности.

Интерпретация Z -индекса приведена в табл. 5.

Воспроизводимость результатов испытаний в лабораториях – участницах эксперимента признают удовлетворительной, если выполняется условие

$$|\bar{X}_1 - \bar{X}_2| \leq R''$$

где $R'' = 0,71 R$ (при $P = 0,95$); X_1 и X_2 – результаты испытаний в первой и второй испытательных лабораториях – участницах эксперимента соответственно.

Если норматив (предел) воспроизводимости R не установлен в рабочей документации на метод испытаний, то R'' при доверительной вероятности $P = 0,95$ рассчитывается по формуле

$$R'' = 1,96 \sigma(\ddot{A}),$$

где $\sigma(\ddot{A})$ – среднеквадратичное отклонение воспроизводимости результатов испытаний, установленное в нормативных документах на метод испытаний.

Таким образом, все полученные с помощью портативной аппаратуры результаты являются кондиционными, а заявленные диапазоны чувствительности – достижимыми (см. табл. 4).

³ ГОСТ 33850-2016. Почвы. Определение химического состава методом рентгенофлуоресцентной спектрометрии. М.: Стандартинформ, 2019. 16 с.

⁴ ФР.1.31.2010.07761 (СТП ИГХ-022-2010). Методика определения массовой доли ванадия, хрома, никеля, кобальта, меди, цинка, свинца в горных породах, почвах, илах и донных отложениях рентгено-флуоресцентным методом (аттестована Испытательным аналитическим центром ИРГИРЕДМЕТ, свидетельство № 73/2010 от июля 2008 г.).

⁵ ГОСТ ISO/IEC 17043-2013. Основные требования к проведению проверки квалификации. М.: Стандартинформ, 2014. 39 с.



Таблица 4. Результаты межлабораторного контроля

Table 4. Interlaboratory control results

Наименование объекта	Рабочие пробы со стабильным содержанием определяемых элементов							
Образец	1-К				2-К			
Контролируемый показатель	Ni, мг/кг	Cu, мг/кг	Pb, мг/кг	Zn, мг/кг	Ni, мг/кг	Cu, мг/кг	Pb, мг/кг	Zn, мг/кг
Приписное значение	48,3±14,5	24,7±8,3	15,2±4,6	59,3±17,8	34,2±10,3	34,5±0,35	16,7±5	42,8±18,8
Результаты испытания ХАЛ СШГ	38	23	13	56	26	29	19	39
Стандартное отклонение компетентности по методике испытания	±9	±9	±4	±8	±8	±9	±4	±7
Значение Z-индекса для ХАЛ СШГ	1,14	0,19	0,55	0,41	1,03	0,61	0,6	0,54
Результаты испытания ЛРМА ИГХ	41	26	14	62	28	26	14	45
Стандартное отклонение компетентности по методике испытания	±12	±8	±5	±19	±8	±8	±5	±14
Значение Z-индекса для ЛРМА ИГХ	0,61	0,16	0,24	0,14	0,77	1,06	0,54	0,16
Предел воспроизводимости ($P = 0,95$) для участников эксперимента $ \bar{X}_1 - \bar{X}_2 $	3	3	1	6	2	3	5	6
R''	73,3	20,7	81,6	35,3	88,3	19,6	73,9	41,7
$ \bar{X}_1 - \bar{X}_2 \leq R''$	$3 \leq 73,3$	$3 \leq 20,7$	$1 \leq 81,6$	$6 \leq 35,3$	$2 \leq 88,3$	$3 \leq 19,6$	$5 \leq 73,9$	$6 \leq 41,7$
Заключение	Сигнал отсутствует удовлетворительно							
Наименование объекта	Рабочие пробы со стабильным содержанием определяемых элементов							
Образец	3-К				4-К			
Контролируемый показатель	Ni, мг/кг	Cu, мг/кг	Pb, мг/кг	Zn, мг/кг	Ni, мг/кг	Cu, мг/кг	Pb, мг/кг	Zn, мг/кг
Приписное значение	50,2±15,1	28,4± 8,5	17,1±5,13	76,5±22,9	19,6±5,9	37±11,1	18,5±5,5	45,6±13,7
Результаты испытания ХАЛ СШГ	49	27	14	74	22	26	21	46
Стандартное отклонение компетентности по методике испытания	±10	±9	±4	±9	±8	±9	±4	±7
Значение Z-индекса для ХАЛ СШГ	0,12	0,24	0,77	0,28	0,3	1,22	0,63	0,06
Результаты испытания ЛРМА ИГХ	44	28	11	80	12	25	18	44
Стандартное отклонение компетентности по методике испытания	±13	±8	±4	±25	±3	±8	±6	±14
Значение Z-индекса для ЛРМА ИГХ	0,48	0,05	1,53	0,14	2	1,5	0,08	0,11
Предел воспроизводимости ($P = 0,95$) для участников эксперимента $ \bar{X}_1 - \bar{X}_2 $	5	1	3	6,08	10	1	3	2
R''	67,6	19,6	84,8	30,9	110,7	20,3	68,1	40,3
$ \bar{X}_1 - \bar{X}_2 \leq R''$	$5 \leq 67,6$	$1 \leq 19,6$	$3 \leq 84,8$	$6,08 \leq 30,9$	$10 \leq 110,7$	$1 \leq 20,3$	$3 \leq 68,1$	$2 \leq 40,3$
Заключение	Сигнал отсутствует удовлетворительно							

Примечание. ХАЛ СШГ – химико-аналитическая лаборатория института «Сибирская школа геонаук» Иркутского национального исследовательского технического университета; ЛРМА ИГХ – лаборатория рентгеновских методов анализа Института геохимии им. А.П. Виноградова СО РАН.



Таблица 5. Интерпретация Z-индекса

Table 5. Z-index interpretation

Z-индекс	Качество результатов испытаний, проведенных в лаборатории
$-2 \leq Z \leq 2$	Удовлетворительное
$-3 \leq Z \leq -2$ $2 < Z \leq 3$	Сомнительное, подлежащее дополнительной проверке
$3 < Z < -3$	Неудовлетворительное

Закключение

Проведенные исследования показали, что с использованием собственных калибровок и приборных режимов измерения результаты, полученные методом экспрессного РФА-анализа, характеризуются меньшей погрешностью, чем допустимые аттестованные погрешности, представленные в паспорте на государственные стандартные образцы. Полученные результаты доказывают, что современная портативная специализированная аппаратура для геохимических работ после калибровки на эталонных коллекциях позволяет достичь метрологических параметров количественного химического анализа, делающих бессмысленным последующее уточнение результатов с помощью атомно-эмиссионной спектроскопии с индуктивно связанной плазмой или атомно-абсорбционной спектроскопии. Также в ходе эксперимента установлено, что современные портативные РФА-анализаторы не уступают по качеству получаемых резуль-

татов стационарным рентгеновским приборам, а скорость выполнения операций при этом значительно выше.

Таким образом, на основании всех полученных данных можно заключить, что РФА имеет значительный потенциал при решении задач геолого-поисковых работ. Мобильность, экспрессность, чувствительность и точность РФА делают его оптимальным инструментом для исследования геологических материалов и определения их химического состава в режиме реального времени, как этого требуют современные геологические проекты. Представления о предварительном полуколичественном характере таких работ справедливы для устаревшей или неспециализированной аппаратуры и случаев, когда задача получить высокоточный результат не ставилась или не была успешно реализована, поскольку не был проведен необходимый комплекс процедур по градуировке и подбору необходимых методик и параметров выполнения измерений.

Список источников

1. Лонцих С.В., Недлер В.В., Райхбаум Я.Д., Хохлов В.В. Спектральный анализ при поисках рудных месторождений. Л.: Недра, 1969. 294 с.
2. Butler O.T., Cairns W.R.L., Cook J.M., Davidson Ch.M., Mertz-Kraus R. Atomic spectrometry update – a review of advances in environmental analysis // Journal of Analytical Atomic Spectrometry. 2018. Vol. 33. Iss. 1. P. 8–56. <https://doi.org/10.1039/c7ja90059g>.
3. Carter S., Clough R., Fisher A., Gibson B., Russell B. Atomic spectrometry update: review of advances in the analysis of metals, chemicals and materials // Journal of Analytical Atomic Spectrometry. 2022. Vol. 37. P. 2207–2281. <https://doi.org/10.1039/D2JA90050E>.
4. Petrov L.L., Kuznetsova O.V. Comparison of modern techniques of element analysis of mineral substances based on the data of international program of proficiency testing (GeoPT) // International Congress on Analytical Sciences ICAS-2006 (Moscow, 25–30 June 2006). Moscow, 2006. P. 455.
5. Ревенко А.Г. Применение стандартных образцов сравнения при рентгенофлуоресцентном анализе геологических проб // Стандартные образцы. 2013. № 4. С. 3–11. EDN: RUYRXN.
6. Васильева И.Е., Шабанова Е.В., Ступакова Г.А., Канева Е.В., Шакирова А.А., Игнатьева Е.Э. Стандартные образцы почв для исследований в агрохимии и геохимии: назначение, сходство и отличие // Плодородие. 2023. № 2. С. 47–55. <https://doi.org/10.25680/S19948603.2023.131.11>. EDN: ULHYTG.
7. Симак В.А., Кордюков С.В. Применение стандартных образцов состава при рентгеноспектральном флуоресцентном анализе твердых полезных ископаемых // Стандартные образцы. 2013. № 4. С. 11–15. EDN: RUYRXX.
8. Петров Л.Л., Романов В.А., Анчутина Е.А. Многоэлементные стандартные образцы состава



в геоанализе. Национальные коллекции: совпадения и различия // Стандартные образцы. 2008. № 1. С. 18–26. EDN: MJDDYX.

9. Ревенко А.Г., Пашкова Г.В. Рентгенофлуоресцентный анализ: современное состояние и перспективы развития // Журнал аналитической химии. 2023. Т. 78. № 11. С. 980–1001. <https://doi.org/10.31857/S0044450223110130>. EDN: MNFDQX.

10. Виноградов А.П. Геохимия редких и рассеянных химических элементов в почвах. М.: Изд-во Академии наук СССР, 1957. 238 с.

11. Виноградов А.П. Среднее содержание химических элементов в главных типах изверженных пород земной коры // Геохимия. 1962. № 7. С. 555–571. EDN: SIZCQF.

12. Гребнева-Балюк О.Н. Новый способ нахождения пределов определения элементов, оценки динамического диапазона определяемых содержаний и выявления матричных и межэлементных влияний в спектральном анализе (атомно-абсорбционная спектрометрия и ИСП-методы анализа) // Журнал аналитической химии. 2022. Т. 77. № 1. С. 53–69. <https://doi.org/10.31857/S0044450222010042>. EDN: IVRXXQ.

13. Будяк А.Е., Скузоватов С.Ю., Тарасова Ю.И., Ванг К., Горячев Н.А. Единая неопротерозойская–раннепалеозойская эволюция рудоносных осадочных комплексов юга Сибирского кратона // Доклады Академии наук. 2019. Т. 484. № 3. С. 335–339. <https://doi.org/10.31857/S0869-56524843335-339>. EDN: MIMDQW.

14. Будяк А.Е., Горячев Н.А., Скузоватов С.Ю. Геодинамические предпосылки формирования масштабного оруденения южного обрамления сибирского кратона в протерозое // Доклады Академии наук. 2016. Т. 470. № 5. С. 562–565. <https://doi.org/10.7868/S0869565216290181>. EDN: WLNNIH.

15. Паршин А.В., Абрамова В.А., Мельников В.А., Развозжаева Э.А., Будяк А.Е. Перспективы благородно-редкометалльного оруденения нижнепротерозойских отложений на территории Байкальской горной области // Вестник Иркутского государственного технического университета. 2013. № 3. С. 53–59. EDN: PYAKEB.

16. Tarasova Yu.I., Budyak A.E., Chugaev A.V., Goryachev N.A., Tauson V.L., Skuzovatov S.Yu., et. al. Mineralogical and isotope-geochemical ($\delta^{13}\text{C}$, $\delta^{34}\text{S}$ and Pb-Pb) characteristics of the Krasny gold mine (Baikal-Patom Highlands): constraining ore-forming mechanisms and the model for Sukhoi Log-type deposits // Ore Geology Reviews. 2020. Vol. 119. P. 103365. <https://doi.org/10.1016/j.oregeorev.2020.103365>.

17. Бабяк В.Н., Блинов А.В., Тарасова Ю.И., Будяк А.Е. Новые данные о геолого-структурных особенностях золоторудных месторождений Ожерелье, Ыканское, Угахан и Голец Высочайший // Науки о Земле и недропользование. 2019. Т. 42. № 4. С. 388–412. <https://doi.org/10.21285/2686-9993-2019-42-4-388-412>. EDN: UWNZEJ.

18. Пупышев А.А., Данилова Д.А. Атомно-эмиссионный спектральный анализ с индуктивно связанной плазмой и тлеющим разрядом по Гримму. Екатеринбург: Изд-во УГТУ – УПИ, 2002. 202 с. EDN: KUTCIZ.

19. Асеева Е.Н., Самонова О.А. Сравнительный анализ результатов определения химических элементов в фоновых лесных почвах разными спектральными методами // Вестник Московского университета. Серия 5. География. 2022. № 5. С. 3–15. EDN: FPCTNO.

20. Седых Э.М., Громьяк И.Н., Лоренц К.А., Скрипник А.Я., Колотов В.П. Методический подход к анализу горных пород и метеоритов методом атомно-эмиссионной спектрометрии с индуктивно связанной плазмой // Журнал аналитической химии. 2019. Т. 74. № 4. С. 297–305. <https://doi.org/10.1134/S0044450219040121>. EDN: YYELQD.

References

1. Lontsikh S.V., Nedler V.V., Rajhbaum Ya.D., Khokhlov V.V. *Spectral analysis when searching for ore deposits*. Leningrad: Nedra; 1969, 294 p. (In Russ.).

2. Butler O.T., Cairns W.R.L., Cook J.M., Davidson Ch.M., Mertz-Kraus R. Atomic spectrometry update – a review of advances in environmental analysis. *Journal of Analytical Atomic Spectrometry*. 2018;33(1):8-56. <https://doi.org/10.1039/c7ja90059g>.

3. Carter S., Clough R., Fisher A., Gibson B., Russell B. Atomic spectrometry update: review of advances in the analysis of metals, chemicals and materials. *Journal of Analytical Atomic Spectrometry*. 2022;37:2207-2281. <https://doi.org/10.1039/D2JA90050E>.

4. Petrov L.L., Kuznetsova O.V. Comparison of modern techniques of element analysis of mineral substances based on the data of international program of proficiency testing (GeoPT). In: *International Congress on Analytical Sciences ICAS-2006*. 25–30 June 2006, Moscow. Moscow; 2006, p. 455.

5. Revenko A.G. The use of certified reference materials in the X-ray fluorescence analysis of geological samples. *Standartnye obraztsy = Certified Reference Materials*. 2013;4:3-11. (In Russ.). EDN: RUYRXN.



6. Vasil'eva I.E., Shabanova E.V., Stupakova G.A., Kaneva E.V., Shakirova A.A., Ignatieva E.E. Soil-matrix reference materials for agrochemistry and geochemistry researching: purpose, similarity and difference. *Plodorodie*. 2023;2:47-55. (In Russ.). <https://doi.org/10.25680/S19948603.2023.131.11>. EDN: ULHYTG.
7. Simakov V.A., Kordyukov S.V. The use of reference materials of composition with X-ray fluorescent analysis of solid minerals. *Standartnye obraztsy = Certified Reference Materials*. 2013;4:11-15. (In Russ.). EDN: RUYRXX.
8. Petrov L.L., Romanov V.A., Anchutina E.A. Multielement reference standards for composition in geoanalysis. National collections: similarities and differences. *Standartnye obraztsy = Certified Reference Materials*. 2008;1:18-26. (In Russ.). EDN: MJDDYX.
9. Revenko A.G., Pashkova G.V. X-ray fluorescence analysis: current state and development prospects. *Zhurnal analiticheskoi khimii*. 2023;78(11):980-1001. (In Russ.). <https://doi.org/10.31857/S0044450223110130>. EDN: MNFDQX.
10. Vinogradov A.P. *Geochemistry of rare and distributed chemical elements in soils*. Moscow: Academy of Sciences of the USSR; 1957, 238 p. (In Russ.).
11. Vinogradov A.P. Average content of chemical elements in the main types of igneous rocks of the earth's crust. *Geokhimiya*. 1962;7:555-571 (In Russ.). EDN: SIZCQF.
12. Grebneva-Balyuk O.N. A new method for finding the limits of quantification of elements, estimating dynamic range, and detecting matrix and interelement interferences in spectral analysis (atomic absorption spectrometry and ICP analysis methods). *Zhurnal analiticheskoi khimii*. 2022;1:53-69. (In Russ.). <https://doi.org/10.31857/S0044450222010042>. EDN: IVRXXQ.
13. Budyak A.E., Skuzovatov S.Y., Tarasova Y.I., Wang K., Goryachev N.A. Common neoproterozoic–early paleozoic evolution of ore-bearing sedimentary complexes in the southern Siberian craton. *Doklady Akademii nauk*. 2019;484(3):335-339. (In Russ.). <https://doi.org/10.31857/S0869-56524843335-339>. EDN: MIMDQW.
14. Budyak A.E., Goryachev N.A., Skuzovatov S.Y. Geodynamic background for large-scale mineralization in the southern environs of the Siberian craton in the proterozoic. *Doklady Akademii nauk*. 2016;470(5):562-565. (In Russ.). <https://doi.org/10.7868/S0869565216290181>. EDN: WLNNIH.
15. Parshin A.V., Abramova V.A., Melnikov V.A., Razvozhzaeva E.A., Budyak A.E. Prospects of noble and rare metal mineralization in lower proterozoic sediments of Baikal mountain region. *Vestnik Irkutskogo gosudarstvennogo tekhnicheskogo universiteta = Proceedings of Irkutsk State Technical University*. 2013;3(74):53-59. (In Russ.). EDN: PYAKEB.
16. Tarasova Yu.I., Budyak A.E., Chugaev A.V., Goryachev N.A., Tauson V.L., Skuzovatov S.Yu., et. al. Mineralogical and isotope-geochemical ($\delta^{13}\text{C}$, $\delta^{34}\text{S}$ and Pb-Pb) characteristics of the Krasnyi gold mine (Baikal-Patom Highlands): constraining ore-forming mechanisms and the model for Sukhoi Log-type deposits. *Ore Geology Reviews*. 2020;119:103365. <https://doi.org/10.1016/j.oregeorev.2020.103365>.
17. Babyak V.N., Blinov A.V., Tarasova J.I., Budyak A.E. New data on the geological and structural features of the Ozhereliye, Ykanskoie, Ugahan and Golets Vysochaishy gold fields. *Nauki o Zemle i nedropol'zovanie = Earth sciences and sub-soil use*. 2019;42(4):388-412. (In Russ.). <https://doi.org/10.21285/2686-9993-2019-42-4-388-412>. EDN: UWHZEJ.
18. Pupyshev A.A., Danilova D.A. *Atomic emission spectral analysis with inductively coupled plasma and Grimm glow discharge*. Ekaterinburg: Ural State Technical University – Ural Polytechnic Institute; 2002, 202 p. (In Russ.). EDN: KUTCIZ.
19. Aseyeva E.N., Samonova O.A. Comparison of results obtained through the analysis of chemical elements in background forest soils by different spectroscopy methods. *Vestnik Moskovskogo universiteta. Seriya 5. Geografiya = Lomonosov Geography Journal*. 2022;5:3-15. (In Russ.). EDN: FPCTNO.
20. Sedykh E.M., Gromyak I.N., Lorents K.A., Skripnik A.Y., Kolotov V.P. A methodological approach to the analysis of rocks and meteorites by inductively coupled plasma atomic emission spectrometry. *Zhurnal analiticheskoi khimii*. 2019;74(4): 297-305. (In Russ.). <https://doi.org/10.1134/S0044450219040121>. EDN: YYELQD.



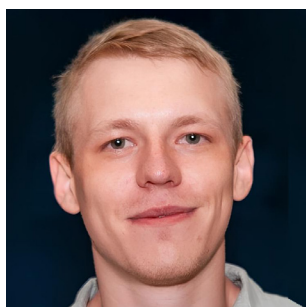
Информация об авторах / Information about the authors



Кузнецова Ольга Владимировна,
кандидат химических наук, доцент,
ведущий инженер-химик химико-аналитической лаборатории,
институт «Сибирская школа геонаук»,
Иркутский национальный исследовательский технический университет,
г. Иркутск, Россия,
✉ olvku20@mail.ru
<https://orcid.org/0000-0001-5372-334X>
Olga V. Kuznetsova,
Cand. Sci. (Chem.), Associate Professor,
Leading Chemical Engineer of the Chemical-Analytical Laboratory,
Siberian School of Geosciences,
Irkutsk National Research Technical University,
Irkutsk, Russia,
✉ olvku20@mail.ru
<https://orcid.org/0000-0001-5372-334X>



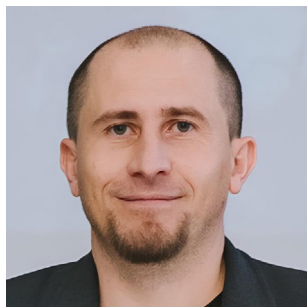
Качор Ольга Леонидовна,
доктор технических наук,
руководитель департамента геоэкологии,
институт «Сибирская школа геонаук»,
Иркутский национальный исследовательский технический университет,
г. Иркутск, Россия,
olgakachor@geo.istu.edu
<https://orcid.org/0000-0003-1889-9934>
Olga L. Kachor,
Dr. Sci. (Eng.),
Head of Geoecology Department,
Siberian School of Geosciences,
Irkutsk National Research Technical University,
Irkutsk, Russia,
olgakachor@geo.istu.edu
<https://orcid.org/0000-0003-1889-9934>



Матюхин Игорь Андреевич,
студент, старший лаборант-исследователь,
институт «Сибирская школа геонаук»,
Иркутский национальный исследовательский технический университет,
г. Иркутск, Россия,
matyuhinia@ex.istu.edu
<https://orcid.org/0009-0003-0968-3039>
Igor A. Matyuhin,
Student, Senior Research Assistant,
Siberian School of Geosciences,
Irkutsk National Research Technical University,
Irkutsk, Russia,
matyuhinia@ex.istu.edu
<https://orcid.org/0009-0003-0968-3039>



Икрамов Зиёвиддин Лутфиддин угли,
студент, старший лаборант-исследователь,
институт «Сибирская школа геонаук»,
Иркутский национальный исследовательский технический университет,
г. Иркутск, Россия,
ziyoviddin.ikramov1992@gmail.com
<https://orcid.org/0009-0006-2708-0989>
Ziyoviddin L. Ikramov,
Student, Senior Research Assistant,
Siberian School of Geosciences,
Irkutsk National Research Technical University,
Irkutsk, Russia,
ziyoviddin.ikramov1992@gmail.com
<https://orcid.org/0009-0006-2708-0989>



Паршин Александр Вадимович,

кандидат геолого-минералогических наук,
научный руководитель института «Сибирская школа геонаук»,
Иркутский национальный исследовательский технический университет,
г. Иркутск, Россия,
научный сотрудник лаборатории геохимии рудообразования
и геохимических методов поисков,
Институт геохимии им. А.П. Виноградова СО РАН,
г. Иркутск, Россия,
sarhin@geo.istu.edu
<https://orcid.org/0000-0003-3733-2140>

Alexander V. Parshin,

Cand. Sci. (Geol. & Mineral.),
Scientific Director of the Siberian School of Geosciences,
Irkutsk National Research Technical University,
Irkutsk, Russia,
Researcher of the Laboratory of Geochemistry of Ore Formation
and Geochemical Prospecting Methods,
A.P. Vinogradov Institute of Geochemistry SB RAS,
Irkutsk, Russia,
sarhin@geo.istu.edu
<https://orcid.org/0000-0003-3733-2140>

Вклад авторов / Contribution of the authors

Все авторы сделали эквивалентный вклад в подготовку публикации.

The authors contributed equally to this article.

Конфликт интересов / Conflict of interests

Авторы заявляют об отсутствии конфликта интересов.

The authors declare no conflicts of interests.

Все авторы прочитали и одобрили окончательный вариант рукописи.

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

Информация о статье / Information about the article

Статья поступила в редакцию 19.09.2023; одобрена после рецензирования 27.10.2023; принята к публикации 23.11.2023.

The article was submitted 19.09.2023; approved after reviewing 27.10.2023; accepted for publication 23.11.2023.

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

Научная статья

УДК 622.276:553.982.23:004.942

EDN: KLCTFQ

DOI: 10.21285/2686-9993-2023-46-4-402-412

Уточнение результатов решения задач разработки залежей
Волго-Уральской нефтегазоносной провинции с использованием
методов ранжирования геолого-статистических моделейР.А. Гилязетдинов^{a,✉}, Л.С. Кулешова^b, В.В. Мухаметшин^c,Р.Ф. Якупов^d, В.А. Грищенко^e

^{a,b,d,e}Институт нефти и газа Уфимского государственного нефтяного технического университета –
филиал в г. Октябрьском, г. Октябрьский, Россия

^cУфимский государственный нефтяной технический университет, г. Уфа, Россия

Резюме. Целью представленного исследования являлся комплексный анализ данных о геолого-физических свойствах пластов и насыщающих их флюидов Волго-Уральской нефтегазоносной провинции с использованием методов ранжирования геолого-статистических моделей. Проведенный дискриминантный анализ по качественным критериям (тип коллектора и стратиграфическая приуроченность) позволил выявить во всех случаях зоны неопределенности, которые оказывают влияние на эффективность принятия управленческих решений в условиях объектов-аналогов. На основании этого для шести моделей произведены уточнение и актуализация результатов по принципу расчета значений ранговой уникальности тремя методами как для каждой модели по отдельности, так и для систем моделей в рамках использования их в пределах полученных распределений объектов в осях канонических дискриминантных функций. Сформулированы рекомендации теоретического и практического назначения касательно использования геолого-статистических моделей в рамках эксплуатации залежей Волго-Уральской нефтегазоносной провинции. Полученные результаты могут быть использованы при решении широкого круга практических задач проактивного управления ресурсами, что позволит эффективно определить наилучшую стратегию для успешного извлечения остаточных и трудноизвлекаемых запасов нефти. При помощи предложенной таблицы ранжирования параметров можно с высокой долей вероятности определить наиболее неустойчивые параметры и нивелировать фактор неоднородности и неравновесности промысловых данных. На основании результатов исследования установлено, что при реализации идентификации принадлежности объектов к той или иной группе в осях канонических дискриминантных функций происходит формирование зоны неопределенности, которая способствует повышению рисков принятия неэффективных управленческих решений при разработке различных по категории активов недропользователей. При помощи методов ранжирования геолого-статистических моделей предложен алгоритм построения иерархичной системы, которая позволяет как значительно расширить область применения результатов геолого-статистического моделирования в нефтегазовом деле, так и снизить риск получения непредставительных результатов.

Ключевые слова: геолого-статистическое моделирование, дифференциация и группирование залежей, ранговая уникальность моделей, разработка нефтяных месторождений, геолого-геофизические характеристики продуктивных пластов

Для цитирования: Гилязетдинов Р.А., Кулешова Л.С., Мухаметшин В.В., Якупов Р.Ф., Грищенко В.А. Уточнение результатов решения задач разработки залежей Волго-Уральской нефтегазоносной провинции с использованием методов ранжирования геолого-статистических моделей // Науки о Земле и недропользование. 2023. Т. 46. № 4. С. 402–412. <https://doi.org/10.21285/2686-9993-2023-46-4-402-412>. EDN: KLCTFQ.



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

Original article

Refining solutions of development problems of the Volga-Ural oil and gas province fields using geological and statistical model ranking methods

Ruslan A. Gilyazetdinov^{a✉}, Lyubov S. Kuleshova^b, Vyacheslav V. Mukhametshin^c,
Rustem F. Yakupov^d, Vadim A. Grishchenko^e

^{a,b,d,e}*Institute of Oil and Gas of the Ufa State Petroleum Technological University,
Oktyabrsky Branch, Oktyabrsky, Russia*

^c*Ufa State Petroleum Technological University, Ufa, Russia*

Abstract. The purpose of the present research is to provide a comprehensive analysis of data on the geological and physical properties of formations and the fluids saturating them in the Volga-Ural oil and gas province using the methods of geological and statistical model ranking. The discriminant analysis conducted on the basis of qualitative criteria (reservoir type and stratigraphic confinement) identified in all cases the zones of uncertainty, which affect the effectiveness of managerial decision-making in the conditions of analog objects. On this score, the results for six models were refined and updated according to the principle of rank uniqueness value calculation by three methods, both for each model individually and for model systems while using them within the obtained distributions of objects in the axes of canonical discriminant functions. Theoretical and practical recommendations were given regarding the use of geological and statistical models in the development of Volga-Ural oil and gas province fields. The results obtained can be used to solve a wide range of practical problems of proactive resource management, which enable effective determination of the best strategy for the successful extraction of residual and hard-to-recover oil reserves. The proposed parameter ranking table allows both to determine the most unstable parameters with a high degree of probability and to level the factor of heterogeneity and disequilibrium of field data. The conducted study established that identification of object association with a particular group in the axes of canonical discriminant functions leads to the formation of the zone of uncertainty. The latter increases the risks of making ineffective managerial decisions when developing different categories of subsoil users' assets. Using the methods of ranking geological and statistical models, an algorithm for constructing a hierarchical system is proposed, which allows to expand the application field of the results of geological and statistical modeling in the oil and gas industry as well as to reduce the risk of nonrepresentative results.

Keywords: geological and statistical modeling, field differentiation and grouping, model rank uniqueness, oil field development, geological and geophysical characteristics of productive formations

For citation: Gilyazetdinov R.A., Kuleshova L.S., Mukhametshin V.V., Yakupov R.F., Grishchenko V.A. Refining solutions of development problems of the Volga-Ural oil and gas province fields using geological and statistical model ranking methods. *Nauki o Zemle i nedropol'zovanie = Earth sciences and subsoil use*. 2023;46(4):402-412. (In Russ.). <https://doi.org/10.21285/2686-9993-2023-46-4-402-412>. EDN: KLCTFQ.

Введение

Волго-Уральская нефтегазоносная провинция является вторым по величине мегаобъектом, расположенным в пределах Русской платформы и включает в себя более трети месторождений жидких углеводородов Российской Федерации. Основной тренд развития рассматриваемой нефтегазоносной территории характеризуется сложными технико-экономическими условиями реализации процессов разработки наряду со значительным объемом накопленной разнородной информации, что

накладывает ряд ограничений прикладного и практического характера на реализацию и принятие обоснованных решений по управлению активами [1–4]¹. Возникновение неопределенностей при попытке структурировать большое количество информации с применением различных подходов обусловлено сложностью повсеместного контроля и регулирования нелинейных процессов в добыче жидких углеводородов из-за:

– увеличения объема входных параметров, необходимых для учета и обработки, и их зна-

¹ Токарев М.А. Комплексный геолого-промысловый контроль за текущей нефтеотдачей при вытеснении нефти водой: учеб. пособие. М.: Недра, 1990. 268 с.



чительным варьированием в пределах скважин, вскрывших одну и ту же продуктивную залежь;

- снижения количества и качества геолого-разведочных работ по залежам, представление о которых базируется на небольшом количестве исследований или же отсутствует вовсе;

- увеличения числа истощенных залежей, в которых по косвенным данным процент варьирования остаточных запасов нефти находится в пределах 5–15 % [5].

Для решения задач разработки залежей используется ряд инструментов и методов, которые позволяют путем снижения размерности исходных данных значительно упростить и трансформировать процесс поиска закономерностей, аналогий и связей между параметрами. В современных условиях данная процедура крайне необходима из-за кратного увеличения источников информации, широкого дублирования отчетностей различных уровней и при определенных обстоятельствах снижения актуальности данных еще до поступления к конечному потребителю – интерпретатору или исследователю. Различные методики расчетов приводят к формированию неравномерного, разрозненного, а часто противоречивого понятия об объекте исследования, что отражается на эффективности принятия управленческих решений [6].

Материалы и методы исследования

Высокую роль при идентификации залежей в пределах рассматриваемого, как правило, крупного многокомпонентного объекта играет методология, применяемая для качественно и обоснованного выделения однородных групп объектов. Например, в работе [7], посвященной всесторонней реализации процедуры идентификации сложнопостроенных залежей, широко используется ряд методов из теории распознавания образов, а именно метод главных компонент и дискриминантный анализ. При проведении процедуры идентификации залежей на качественном уровне важнейшим этапом исследования выступает поиск необходимой модели распознавания образа, которая давала бы наилучшие результаты группирования объектов. Исходя из этого, для уточнения результатов решения задач геологии и разработки необходимо выбрать наиболее оптимальную методологию для реализации про-

цедуры идентификации залежей с использованием качественных характеристик [8]. Для этого важно создать алгоритм ранжирования получаемых геолого-статистических моделей, который будет базироваться на комплексном учете фактора неопределенности совместно с такими свойствами параметров как их неоднородность и неоднозначность.

Объектом исследования в работе выступает база данных по залежам Волго-Уральской нефтегазоносной провинции, включающая в себя параметры, которые должны успешно:

- отражать эффективность реализации пластовых процессов;
- использоваться при составлении первых проектных документов;
- определяться одними и теми же методами и способами с высокой точностью [9, 10].

Используемые параметры представлены в табл. 1.

Для дальнейшей реализации операции ранжирования полученных геолого-статистических моделей на основе представленных данных создадим пять групп, в каждую из которых войдут по четыре параметра с учетом критерия положительной или отрицательной связи между параметрами, установленной в работе [11].

Результаты исследования и их обсуждение

Введем следующие качественные показатели, которые будут применяться для идентификации: тип коллектора (I) и стратиграфический фактор (II).

В рамках решения задачи по условию (I) рассмотрим результаты проведения дискриминантного анализа для двух мегагрупп объектов, которые представлены терригенными и карбонатными коллекторами соответственно (рисунок). Процент верно сгруппированных объектов в осях первых двух главных компонент составил более 90 %.

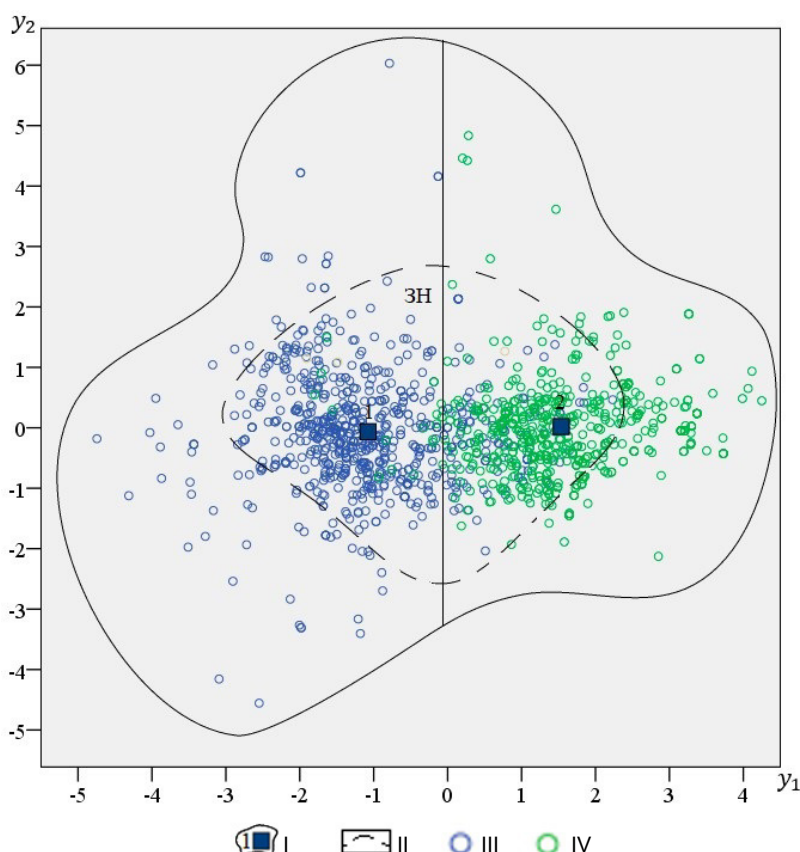
Уравнения канонических дискриминантных функций для решения задач разработки, а именно управления процессами нефтеизвлечения с использованием метода аналогий на залежах с различным типом коллектора, представлены в табл. 2 (1–2). Анализируя полученное распределение объектов в пределах выделенных мегагрупп по критерию «тип коллектора», заметим, что в интервалах изменения значений первой и второй канонических дискриминантных функций имеет место зона неопределенности, обусловленная сходством



Таблица 1. Параметры объекта исследования

Table 1. Parameters of the research object

Группа	Обозначение, расшифровка, единица измерения
1	$H_{зеп}$, глубина залегания пласта, м; $H_{общ}$, общая толщина пласта, м; $H_{эф}$, эффективная нефтенасыщенная толщина пласта, м; $H_{п}$, средняя толщина нефтенасыщенных пропластков, м
2	m_e , коэффициент пористости, д. ед.; K_n , коэффициент нефтенасыщенности, д. ед.; $K_{прон}$, коэффициент проницаемости, мкм ² ; K_p , коэффициент песчаности, д. ед.
3	μ_n , вязкость нефти в пластовых условиях, мПа·с; ρ_n , плотность нефти в поверхностных условиях, т/м ³ ; ρ'_n , плотность нефти в пластовых условиях, т/м ³ ; β , объемный коэффициент нефти
4	μ_e , вязкость воды в пластовых условиях, мПа·с; ρ'_e , плотность воды в поверхностных условиях, т/м ³ ; M , общая минерализации воды, г/л; $t_{пл}$, начальная пластовая температура, °С
5	K_p , коэффициент расчлененности; $P_{пл}$, начальное пластовое давление, МПа; $P_{нас}$, давление насыщения нефти газом, МПа; G , газосодержание пластовой нефти, м ³ /т



Распределение объектов в терригенных и карбонатных коллекторах в осях канонических дискриминантных функций:

I – центры и зоны группирования объектов, приуроченных к карбонатным (1) и терригенным (2) коллекторам; II – границы зоны неопределенности (3H); III–IV – объекты: III – карбонатный коллектор, IV – терригенный коллектор

Object distribution in terrigenous and carbonate reservoirs in the axes of canonical discriminant functions:

I – centroids and grouping zones of the objects associated with carbonate (1) and terrigenous (2) reservoirs; II – boundaries of the uncertainty zone (3H); III–IV – objects: III – carbonate reservoir, IV – terrigenous reservoir



параметров, которые используются для реализации процедуры идентификации объектов Волго-Уральской нефтегазоносной провинции.

Для решения задачи по условию (II) воспользуемся результатами и выводами, полученными при использовании в виде качественного показателя «тип коллектора», что подразумевает раздельное проведение дифференциации и группирования объектов, приуроченных к терригенным и карбонатным коллекторам. По залежам в пределах терригенных коллекторов каменноугольной и девонской систем наблюдается довольно четкое разделение на две группы, при этом процент верно сгруппированных объектов составляет более 95 % в осях первых двух главных компонент. Уравнения канонических дискриминантных функций для решения задач разработки в пределах терригенных коллекторов,

приуроченных к девонской и каменноугольной системам, также отражены в табл. 2 (3–4). Как и в случае решения задачи (I), при группировании залежей по качественному критерию «стратиграфическая приуроченность» наблюдается зона неопределенности, что говорит о возможности тиражирования лучших практик одной системы в условиях другой [12].

Для залежей, приуроченных к карбонатным коллекторам, дискриминантный анализ произведем с учетом трех систем: пермской, каменноугольной и девонской. Процент верно сгруппированных объектов составляет более 85 %. Как и в предыдущих случаях, имеются зоны неопределенности в рамках следующих систем: девонская и каменноугольная, каменноугольная и пермская. Данный факт при комплексном анализе позволяет сказать о том, что объекты, приуроченные к различ-

Таблица 2. Уравнения канонических дискриминантных функций для решения задач разработки в зависимости от исходных условий

Table 2. Canonical discriminant function equations for solving development problems depending on initial conditions

Уравнение	Номер формулы
$y_1 = -0,0001H_{зал} - 0,0001H_{общ} + 0,014H_3 - 0,008H_{II} + 19,233m_r + 0,322K_H + 1,708K_{прон} + 1,164K_{II} - 0,076K_p + 0,013t_{II} + 0,040P_{II} + 0,011\mu_H - 13,034\rho_H + 2,834\rho'_H - 3,4\beta - 0,029P_{нас} - 0,004G + 0,286\mu_B + 6,667\rho'_B + 0,00002M - 0,448;$ $y_2 = 0,00004H_{зал} - 0,006H_{общ} - 0,034H_3 + 0,017H_{II} - 4,275m_r + 3,727K_H + 0,549K_{прон} - 0,470K_{II} + 0,069K_p + 0,059t_{II} - 0,093P_{II} + 0,023\mu_H + 13,595\rho_H + 0,069\rho'_H + 8,495\beta - 0,002P_{нас} - 0,002G + 1,247\mu_B - 4,074\rho'_B + 0,011M - 23,633.$	(1–2)
$y_1 = -0,087H_{зал} + 0,164H_{общ} + 7,131H_3 - 4,084H_{проп} + 12,845m_r + 25,233K_H + 6,255K_{прон} + 40,227K_{II} - 2,527K_p - 2,914t_{II} - 1,699P_{II} - 3,078\mu_H + 3949,975\rho_H + 5666,812\rho'_H + 4402,744\beta + 0,617P_{нас} - 2,087G - 61,760\mu_B + 7038,713\rho'_B - 0,281M - 10508,424;$ $y_2 = -0,088H_{зал} + 0,144H_{общ} + 7,068H_3 - 3,517H_{проп} + 26,758m_r + 21,803K_H + 7,011K_{прон} + 39,709K_{II} - 2,641K_p - 3,205t_{II} - 2,326P_{II} - 3,101\mu_H + 3948,875\rho_H + 5692,390\rho'_H + 4428,074\beta + 0,392P_{нас} - 2,162G - 59,105\mu_B + 6954,378\rho'_B - 0,275M - 10438,054.$	(3–4)
$y_1 = -0,003H_{зал} + 0,011H_{общ} - 0,011H_3 + 0,029H_{II} + 4,886m_r + 1,498K_H + 0,449K_{прон} + 0,379K_{II} + 0,024K_p + 0,019t_{II} - 0,019P_{II} + 0,016\mu_H - 15,731\rho_H + 6,302\rho'_H + 6,332\beta - 0,129P_{нас} + 0,018G - 1,460\mu_B - 1,249\rho'_B + 0,002M + 5,199;$ $y_2 = 0,001H_{зал} + 0,011H_{общ} - 0,018H_3 - 0,005H_{II} - 16,632m_r + 8,251K_H + 5,583K_{прон} - 1,740K_{II} - 0,068K_p + 0,036t_{II} - 0,092P_{II} - 0,001\mu_H + 2,597\rho_H + 11,298\rho'_H - 2,173\beta + 0,030P_{нас} + 0,006G - 0,983\mu_B + 4,182\rho'_B + 0,002M - 19,281.$	(5–6)



ным стратиграфическим системам, имеют между собой сходства. Это можно без труда заметить, например, при рассмотрении объектов турнейского и фаменского ярусов, между которыми прослеживается схожесть в определенных геолого-физических свойствах и параметрах систем. Уравнения канонических дискриминантных функций для решения задач разработки залежей карбонатных коллекторов, приуроченных к девонской, каменноугольной и пермской системам, представлены в табл. 2 (5–6).

Полученные геолого-статистические модели, представленные в табл. 2, позволили выявить следующее:

- при проведении процедуры идентификации на качественном уровне с использованием критериев «тип коллектора» и «стратиграфическая приуроченность» образуется зона неопределенности, что накладывает ряд трудностей при дальнейшем их использовании в рамках поиска объектов-аналогов и применения методов распознавания образов;

- зона неопределенности, образуемая при решении задачи (I), формируется за счет высокой корреляции используемых параметров;

- зона неопределенности, образуемая при решении задачи (II), формируется за счет наличия в стратиграфических единицах схожих по различным внутренним и внешним критериям объектов.

Из вышеуказанных аспектов следует, что учет зоны неопределенности при выборе геолого-статистической модели для дальнейших исследований является ключевым аспектом получения точных результатов интерпретации и принятия ряда эффективных управленческих решений. Для этого требуется уточнение полученных результатов с использованием известных методов и алгоритмов. Одним из наиболее часто применяемых подходов к решению поставленной задачи является проведение ранжирования определенного объема информации на основе заданного критерия [13–16].

С учетом особенностей и специфики отрасли, в рамках которой проводятся исследования, для уточнения результатов решения задач разработки залежей Волго-Уральской нефтегазоносной провинции используем методы ранжирования на основе теории нечетких множеств [17]. Для этого представим выделенные

в группах параметры в виде трапецевидного нечеткого числа с учетом следующих условий:

- в качестве значений трапецевидного числа будем использовать коэффициенты регрессионных моделей 1–6, полученных после проведения дискриминантного анализа;

- порядок параметров в трапецевидном нечетком числе каждой из групп будет базироваться на критерии возрастания для учета знака коэффициента в регрессионных моделях.

Для успешного и объективного ранжирования геолого-статистических моделей будут использоваться три известных метода: Чью – Парка, Чанга, Кауфмана – Гупты. Рассмотрим каждый из них и запишем формулы для вычисления характеристик, позволяющих провести упорядочивание [18, 19]².

В методе Чью–Парка, помимо вычислительных операций с трапецевидными числами, используется также и фиксированный параметр w , который для решения основных задач принимается равным единице. В рамках задач разработки месторождений в качестве данного параметра будет использоваться свободный член регрессионных моделей 1–6. Формула для расчета комплексной величины X выглядит следующим образом:

$$X(i) = \frac{x_{i1} + x_{i2} + x_{i3} + x_{i4}}{4} + w_i \frac{x_{i2} + x_{i3}}{2}, \quad (7)$$

где $X(i)$ – величина, характеризующая ранг i -ой модели; $x_{i1}, x_{i2}, x_{i3}, x_{i4}$ – значение трапецевидного числа для каждой из моделей; w_i – свободный член i -ой регрессионной модели.

Формирование рейтинга происходит исходя из возрастания значения $X(i)$.

Для метода Чанга в качестве сравниваемой величины выступает значение Y , рассчитанное по формуле

$$Y(i) = \frac{y_{i3}^2 + y_{i3}y_{i4} + y_{i4}^2 - y_{i1}^2 - y_{i1}y_{i2} - y_{i2}^2}{6}, \quad (8)$$

где $Y(i)$ – величина, характеризующая ранг i -ой модели; $y_{i1}, y_{i2}, y_{i3}, y_{i4}$ – значение трапецевидного числа для каждой из моделей.

Формирование рейтинга производится в порядке возрастания величины $Y(i)$.

При использовании метода Кауфмана – Гупты вычисляются значения следующей системы:

² Андерсон Д.А. Дискретная математика и комбинаторика / пер. с англ. М.: Вильямс, 2004. 960 с.



Таблица 3. Результаты ранжирования средних значений параметров для геолого-статистических моделей по методам Чью – Парка, Чанга, Кауфмана – Гупты
Table 3. Results of parameter average values ranking for geological and statistical models according to Chiu – Park, Chang, Kaufman – Gupta methods

Номер моделей i и i'	Среднее отклонение по модели i , %	Среднее отклонение по модели i' , %	Среднее отклонение по моделям i и i' , %	Отношение значений ранговых уникальностей $V_i/V_{i'}$ ед.	Итоговое значение ранговой уникальности для моделей i и i'
1 и 2	12,4	6,4	10,99	1/4	1 и 3
3 и 4	9,8	14,9	12,4	6/2	5 и 4
5 и 6	16,4	3,69	14,5	3/5	2 и 6

$$\begin{cases} kg_1(Z(i)) = \frac{z_{i1} + 2z_{i2} + 2z_{i3} + z_{i4}}{6} \\ kg_2(Z(i)) = \frac{z_{i3} + z_{i4}}{2} \\ kg_3(Z(i)) = z_{i4} - z_{i1} \end{cases}, \quad (9)$$

где $Z(i)$ – величина, характеризующая ранг i -ой модели; $z_{i1}, z_{i2}, z_{i3}, z_{i4}$ – значение трапецевидного числа для каждой из моделей.

Формирование рейтинга происходит путем сравнения величин $kg_1(Z(i)) - kg_3(Z(i))$ между собой. С учетом формул (7–9) и табл. 2 произведем ранжирование геолого-статистических моделей (1–6), в рамках которого вычислим среднее значение отклонения по трем методам и определим ранговую уникальность V_i той или иной модели по отдельности и в совокупности. Последнее представляет собой значение наивысшего ранга, полученное в ходе расчетов. Результаты представлены в табл. 3.

Заключение

Представленные результаты подтверждают мнение о том, что зона неопределенности оказывает влияние на точность расчетов с использованием полученных геолого-статистических моделей. Для снижения рисков принятия ошибочных управленческих решений и получения непредставительных результатов рекомендуется:

– при использовании модели (1) уточнять значения группы параметров 4 в силу того, что они вносят больший вклад (до 45 %) в процент формирования несоответствий между значениями рейтингов;

– при использовании модели (2) опираться на скорректированные данные, полученные в ходе расчетов по модели (1) и на основе их сопоставления между собой давать объективную оценку полученным результатам;

– при использовании модели (4) важно уточнять значения группы параметров 3 и 4 в силу того, что они вносят больший вклад (до 67 %) в процент формирования уровня неопределенности между значениями рейтингов;

– при использовании модели (3) необходимо опираться на скорректированные данные, полученные в ходе расчетов по модели (4) и на основе их сопоставления между собой давать объективную оценку полученным результатам;

– при использовании модели (5) важно уточнять значения группы параметров 2 и 3 в силу того, что они вносят больший вклад (до 54 %) в процент формирования уровня неопределенности между значениями рейтингов;

– при использовании модели (6) необходимо опираться на скорректированные данные, полученные в ходе расчетов по модели (5) и на основе их сопоставления между собой давать объективную оценку полученным результатам.

Указанные рекомендации позволят существенно повысить качество реализации геолого-статистического моделирования как в рамках поиска объекта-аналогов с использованием методов распознавания образов, так и тиражирования лучших практик разработки залежей, относящихся к выделенным в ходе дискриминантного анализ группам [20, 21].



Список источников

1. Yakupov R.F., Mukhametshin V.V., Kuleshova L.S., Mingulov I.Sh. Developing an algorithm for solving a material balance equation in the context of information // Journal of Physics: Conference Series. 2021. Vol. 2032. P. 012053. <https://doi.org/10.1088/1742-6596/2032/1/012053>.
2. Хасанов М.М., Мухамедшин Р.К., Хатмуллин И.Ф. Компьютерные технологии решения многокритериальных задач мониторинга разработки нефтяных месторождений // Вестник инженерингового центра ЮКОС. 2001. № 2. С. 26–29.
3. Мухаметшин В.В. Повышение эффективности управления объектами добычи нефти с использованием метода аналогий // SOCAR Proceedings. 2020. № 4. С. 42–50. <https://doi.org/10.5510/OGP20200400464>. EDN: LYTMHI.
4. Хатмуллин И.Ф., Хатмуллина Е.И., Хамитов А.Т., Гималетдинов Р.А., Мезиков С.Е. Идентификация слабо разработанных зон на месторождениях с трудноизвлекаемыми запасами // Нефтяное хозяйство. 2015. № 1. С. 74–79. EDN: TIJUET.
5. Mukhametshin V.Sh., Andreev V.E., Yaskin S.A. Designing measures to increase oil recovery based on the identification and grouping of deposits // IOP Conference Series: Earth and Environmental Science. 2020. Vol. 579. P. 012013. <https://doi.org/10.1088/1755-1315/579/1/012013>.
6. Кулешова Л.С., Мухаметшин В.Ш. Поиск и обоснование применения инновационных методов добычи углеводородов в осложненных условиях // SOCAR Proceedings. 2022. № 1. С. 71–79. <https://doi.org/10.5510/OGP-2022SI100647>.
7. Krakowska P., Puskarczyk E., Jędrychowski M., Habrat M., Madejski P., Dohnalik M. Innovative characterization of tight sandstones from Paleozoic basins in Poland using X-ray computed tomography supported by nuclear magnetic resonance and mercury porosimetry // Journal of Petroleum Science and Engineering. 2018. Vol. 166. P. 389–405. <https://doi.org/10.1016/j.petrol.2018.03.052>.
8. Mukhametshin V.Sh. Calculation and forecast of current and final oil recovery from wells during depletion // Journal of Physics: Conference Series. 2021. Vol. 2032. P. 012047. <https://doi.org/10.1088/1742-6596/2032/1/012047>.
9. Закревский К.Е., Попов В.Л., Лепилин А.Е., Рыжиков Е.А. Геологические и технологические особенности создания гибких типовых шаблонов геологического моделирования // Нефтяное хозяйство. 2020. № 11. С. 38–43. <https://doi.org/10.24887/0028-2448-2020-11-38-43>. EDN: XLGAQA.
10. Нагульнов М.В., Растегаева Е.В., Зулькарниев Р.З., Асмандияров Р.Н. Факторный анализ успешности геолого-технических мероприятий как инструмент повышения качества геолого-гидродинамических моделей // ПРО-НЕФТЬ. Профессионально о нефти. 2019. № 1. С. 34–38.
11. Mukhametshin V.V., Kuleshova L.S. The role and significance of the stratigraphic factor in the identification of oil fields // IOP Conference Series: Earth and Environmental Science. 2021. Vol. 867. P. 012015. <https://doi.org/10.1088/1755-1315/867/1/012015>.
12. Грищенко В.А., Асылгареев И.Н., Бахтизин Р.Н., Мухаметшин В.В., Якупов Р.Ф. Методический подход к мониторингу эффективности использования ресурсной базы при разработке нефтяных месторождений // SOCAR Proceedings. 2021. № 2. С. 229–237. <https://doi.org/10.5510/OGP2021SI200604>.
13. Дмитриевский А.Н. Ресурсно-инновационная стратегия развития экономики России // Нефтяное хозяйство. 2017. № 5. С. 6–7. EDN: YNWVTF.
14. Еремин Н.А., Королёв М.А., Степанян А.А., Столяров В.Е. Особенности цифровой трансформации активов при реализации инвестиционных нефтегазовых проектов // Газовая промышленность. 2019. № 4. С. 108–119. EDN: ISLUFM.
15. Mukhametshin V.Sh. Rationale for the production of hard-to-recover deposits in carbonate reservoirs // IOP Conference Series: Earth and Environmental Science. 2020. Vol. 579. P. 012012. <https://doi.org/10.1088/1755-1315/579/1/012012>.
16. Орлова И.О., Захарченко Е.И., Скиба Н.К., Захарченко Ю.И. Методический подход к классификации месторождений и поиску месторождений-аналогов // Геология, геофизика и разработка нефтяных и газовых месторождений. 2014. № 12. С. 16–18. EDN: TCBTLR.
17. Mukhametshin V.Sh., Tyncherov K.T., Rakhimov N.R. Geological and statistical modeling of oil recovery of carbonate formations // Journal of Physics: Conference Series. 2021. Vol. 1753. P. 012080. <https://doi.org/10.1088/1742-6596/1753/1/012080>.
18. Tavana M., Soltanifar M., Santos-Arteaga F.J. Analytical hierarchy process: revolution and evolution // Annals of Operations Research. 2023. Vol. 326. Iss. 2. P. 879–907. <https://doi.org/10.1007/s10479-021-04432-2>.
19. Заде Л., Беллман Р. Принятие решений в расплывчатых условиях. М.: Мир, 1976. 142 с.
20. Заде Л. Понятие лингвистической переменной и его применение к принятию приближенных решений. М.: Мир, 1976. 168 с.
21. Мирзаджанзаде А.Х., Степанова Г.С. Математическая теория эксперимента в добыче нефти и газа. М.: Недра, 1977. 229 с.

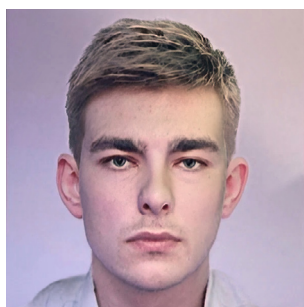


References

1. Yakupov R.F., Mukhametshin V.V., Kuleshova L.S., Mingulov I.Sh. Developing an algorithm for solving a material balance equation in the context of information. *Journal of Physics: Conference Series*. 2021;2032:012053. <https://doi.org/10.1088/1742-6596/2032/1/012053>.
2. Khasanov M.M., Mukhametshin R.K., Khatmullin I.F. Computer technologies for solving multi-criteria monitoring problems of oil field development. *Vestnik inzhiniringovogo tsentra YUKOS*. 2001;2:26-29. (In Russ.).
3. Mukhametshin V.V. Oil production facilities management improving using the analogy method. *SOCAR Proceedings*. 2020;4:42-50. (In Russ.). <https://doi.org/10.5510/OGP20200400464>. EDN: LYTMHI.
4. Khatmullin I.F., Khatmullina E.I., Khamitov A.T., Gimaletdinov R.A., Mezikov S.E. Identification of zones with poor displacement in fields with hard-to-recover reserves. *Neftyanoe khozyaistvo = Oil industry*. 2015;1:74-79. (In Russ.). EDN: TIJUET.
5. Mukhametshin V.Sh., Andreev V.E., Yaskin S.A. Designing measures to increase oil recovery based on the identification and grouping of deposits. *IOP Conference Series: Earth and Environmental Science*. 2020;579:012013. <https://doi.org/10.1088/1755-1315/579/1/012013>.
6. Kuleshova L.S., Mukhametshin V.Sh. Research and justification of innovative techniques employment for hydrocarbons production in difficult conditions. *SOCAR Proceedings*. 2022;1:71-79. (In Russ.). <https://doi.org/10.5510/OGP-2022SI100647>.
7. Krakowska P., Puskarczyk E., Jędrychowski M., Habrat M., Madejski P., Dohnalik M. Innovative characterization of tight sandstones from Paleozoic basins in Poland using X-ray computed tomography supported by nuclear magnetic resonance and mercury porosimetry. *Journal of Petroleum Science and Engineering*. 2018;166:389-405. <https://doi.org/10.1016/j.petrol.2018.03.052>.
8. Mukhametshin V.Sh. Calculation and forecast of current and final oil recovery from wells during depletion. *Journal of Physics: Conference Series*. 2021;2032:012047. <https://doi.org/10.1088/1742-6596/2032/1/012047>.
9. Zakrevskiy K.E., Popov V.L., Lepilin A.E., Ryzhikov E.A. Geological and technological features of creating flexible typical templates for geological modeling. *Neftyanoe khozyaistvo = Oil industry*. 2020;11:38-43. (In Russ.). <https://doi.org/10.24887/0028-2448-2020-11-38-43>. EDN: XLGAQA.
10. Naugolnov M.V., Rastegaeva E.V., Zulkarniev R.Z., Asmandiyarov R.N. Factor analysis of the success of well interventions as a tool for improving the quality of geological and simulation models. *PRONEFT. Professional'no o nefti = PROneft. Professionally about Oil*. 2019;1:34-38. (In Russ.).
11. Mukhametshin V.V., Kuleshova L.S. The role and significance of the stratigraphic factor in the identification of oil fields. *IOP Conference Series: Earth and Environmental Science*. 2021;867:012015. <https://doi.org/10.1088/1755-1315/867/1/012015>.
12. Grishchenko V.A., Asylgareev I.N., Bakhtizin R.N., Mukhametshin V.V., Yakupov R.F. Methodological approach to the resource base efficiency monitoring in oil fields development. *SOCAR Proceedings*. 2021;2:229-237. (In Russ.). <https://doi.org/10.5510/OGP2021SI200604>.
13. Dmitrievsky A.N. Resource-innovative strategy for the development of the Russian economy. *Neftyanoe khozyaistvo = Oil industry*. 2017;5:6-7. (In Russ.). EDN: YNWVTF.
14. Eremin N.A., Korolev M.A., Stepanyan A.A., Stolyarov V.E. Features of digital transformation of assets when realizing investment oil and gas projects. *Gazovaya promyshlennost' = Gas industry*. 2019;4:108-119. (In Russ.). EDN: ISLUFM.
15. Mukhametshin V.Sh. Rationale for the production of hard-to-recover deposits in carbonate reservoirs. *IOP Conference Series: Earth and Environmental Science*. 2020;579:012012. <https://doi.org/10.1088/1755-1315/579/1/012012>.
16. Orlova I.O., Zakharchenko E.I., Skiba N.K., Zakharchenko Yu.I. Methodical approach to fields classification and fields-analogues prospecting. *Geologiya, geofizika i razrabotka neftnykh i gazovykh mestorozhdenii = Geology, geophysics and development of oil and gas fields*. 2014;12:16-18. (In Russ.). EDN: TCBTLR.
17. Mukhametshin V.Sh., Tyncherov K.T., Rakhimov N.R. Geological and statistical modeling of oil recovery of carbonate formations. *Journal of Physics: Conference Series*. 2021;1753:012080. <https://doi.org/10.1088/1742-6596/1753/1/012080>.
18. Tavana M., Soltanifar M., Santos-Arteaga F.J. Analytical hierarchy process: revolution and evolution. *Annals of Operations Research*. 2023;326(2):879-907. <https://doi.org/10.1007/s10479-021-04432-2>.
19. Zadeh L., Bellman R. *Making decisions in fuzzy conditions*. Moscow: Mir; 1976, 142 p. (In Russ.).
20. Zadeh L. *The concept of linguistic variable and its application to approximate decision making*. Moscow: Mir; 1976, 168 p. (In Russ.).
21. Mirzajanzade A.H., Stepanova G.S. *Mathematical theory of experiment in oil and gas mining*. Moscow: Nedra; 1977. 229 p. (In Russ.).



Информация об авторах / Information about the authors



Гилязетдинов Руслан Альбертович,
научный сотрудник кафедры разведки и разработки
нефтяных и газовых месторождений,
Институт нефти и газа Уфимского государственного нефтяного
технического университета – филиал в г. Октябрьском,
г. Октябрьский, Россия,
✉ gilyazetdinov_2023@mail.ru
<https://orcid.org/0009-0002-1931-7035>
Ruslan A. Gilyazetdinov,
Researcher of the Department of Oil and Gas Field
Exploration and Development,
Institute of Oil and Gas of the Ufa State Petroleum
Technological University, Oktyabrsky Branch,
Oktyabrsky, Russia,
✉ gilyazetdinov_2023@mail.ru
<https://orcid.org/0009-0002-1931-7035>



Кулешова Любовь Сергеевна,
кандидат технических наук,
доцент кафедры разведки и разработки
нефтяных и газовых месторождений,
заместитель директора по учебной работе,
Институт нефти и газа Уфимского государственного нефтяного
технического университета – филиал в г. Октябрьском,
г. Октябрьский, Россия,
markl212@mail.ru
<https://orcid.org/0000-0003-2975-3666>
Lyubov S. Kuleshova,
Cand. Sci. (Eng.),
Associate Professor of the Department of Oil and Gas Field
Exploration and Development,
Deputy Director for Academic Work,
Institute of Oil and Gas of the Ufa State Petroleum
Technological University, Oktyabrsky Branch,
Oktyabrsky, Russia,
markl212@mail.ru
<https://orcid.org/0000-0003-2975-3666>



Мухаметшин Вячеслав Вячеславович,
доктор технических наук,
профессор кафедры геологии и разведки нефтяных и газовых месторождений,
Уфимский государственный нефтяной технический университет,
г. Уфа, Россия,
vv@of.ugntu.ru
<https://orcid.org/0000-0003-3283-1047>
Vyacheslav V. Mukhametshin,
Dr. Sci. (Eng.),
Professor of the Department of Oil and Gas Field Geology and Exploration,
Ufa State Petroleum Technological University,
Ufa, Russia,
vv@of.ugntu.ru



Якупов Рустем Фазылович,
кандидат технических наук,
доцент кафедры разведки и разработки
нефтяных и газовых месторождений,
Институт нефти и газа Уфимского государственного нефтяного
технического университета – филиал в г. Октябрьском,
г. Октябрьский, Россия,
rustem_geolog@mail.ru
<https://orcid.org/0000-0001-8666-7460>

**Rustem F. Yakupov,**

Cand. Sci. (Eng.),

Associate Professor of the Department of Oil and Gas Field

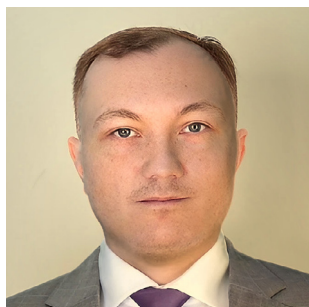
Exploration and Development,

Institute of Oil and Gas of the Ufa State Petroleum

Technological University, Oktyabrsky Branch,

Oktyabrsky, Russia,

rustem_geolog@mail.ru

<https://orcid.org/0000-0001-8666-7460>**Грищенко Вадим Александрович,**

кандидат технических наук,

преподаватель кафедры разведки и разработки

нефтяных и газовых месторождений,

Институт нефти и газа Уфимского государственного нефтяного

технического университета – филиал в г. Октябрьском,

г. Октябрьский, Россия,

GrishchenkoVA@bnipti.rosneft.ru

<https://orcid.org/0009-0008-4998-676X>**Vadim A. Grishchenko,**

Cand. Sci. (Eng.),

Lecturer of the Department of Oil and Gas Field

Exploration and Development,

Institute of Oil and Gas of the Ufa State Petroleum

Technological University, Oktyabrsky Branch,

Oktyabrsky, Russia,

GrishchenkoVA@bnipti.rosneft.ru

<https://orcid.org/0009-0008-4998-676X>**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 12.09.2023; одобрена после рецензирования 04.10.2023; принята к публикации 20.11.2023.

The article was submitted 12.09.2023; approved after reviewing 04.10.2023; accepted for publication 20.11.2023.



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

Научная статья

УДК 622.852:622.882

EDN: WULGWZ

DOI: 10.21285/2686-9993-2023-46-4-413-422



Анализ структуры земель, нарушенных при подземной разработке рудных месторождений

Е.А. Иванов^{a,✉}, Б.Л. Тальгамер^b

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

Резюме. Цель данного исследования заключалась в изучении и анализе структуры нарушенных земель на горнодобывающих предприятиях Восточной Сибири и Дальнего Востока, разрабатывающих рудные месторождения. В настоящее время на исследуемых предприятиях вопрос рекультивации нарушенных земель в проектной документации рассмотрен укрупненно, в связи с чем появляется риск оставить данные территории без должного внимания после завершения работ по добыче. В процессе исследования сделан анализ структуры нарушенных земель по данным проектной документации и полевых наблюдений на четырех горнодобывающих предприятиях. Установлен характер нарушенных участков земель и их площади. В процессе полевых исследований выявлены нарушения, не установленные проектами и требующие неординарных решений по их устранению. Определена усредненная структура нарушенных земель при подземной разработке рудных месторождений, выявлены ее отличия от аналогичной структуры при открытых горных работах. Доказано, что деятельности горнодобывающих предприятий, занимающихся подземной разработкой рудных месторождений, и рекультивации нарушенных земель не уделяется должного внимания, что приводит к нарастанию площади техногенного рельефа и к негативным экологическим последствиям. Представленная методика исследования включает полевые работы с выездом на горнодобывающие предприятия, а также анализ проектных решений и космоснимков.

Ключевые слова: рудные месторождения, подземная разработка, нарушенные земли, рекультивация

Для цитирования: Иванов Е.А., Тальгамер Б.Л. Анализ структуры земель, нарушенных при подземной разработке рудных месторождений // Науки о Земле и недропользование. 2023. Т. 46. № 4. С. 413–422. <https://doi.org/10.21285/2686-9993-2023-46-4-413-422>. EDN: WULGWZ.

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

Original article

Analysis of the structure of lands disturbed by underground mining of ore deposits

Evgeny A. Ivanov^{a,✉}, Boris L. Talgamer^b

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

Abstract. The purpose of the work is to study and analyze the structure of the lands disturbed by the mining enterprises of Eastern Siberia and the Far East developing ore deposits. While the issue of disturbed land reclamation is treated today by the project documentation of the mining enterprises as an aggregate plan, there is a risk of leaving the lands without due attention after the completion of mining operations. The conducted study included the analysis of the disturbed land structure according to the project documentation and field observations at four mining enterprises. As a result, the nature of the disturbed land sites and their area was determined. The field research revealed disturbances not provided by the proj-



ects and requiring extraordinary solutions to eliminate them. The average structure of disturbed lands under underground mining of ore deposits was determined, its differences from the similar structure under open-pit mining were identified. It has been proven that the activities of mining enterprises involved in the underground development of ore deposits and reclamation of disturbed lands lack due attention, which leads to the growth in technogenic relief area and adverse environmental impacts. The presented research methodology includes field work with the visits to mining enterprises, as well as the analysis of design solutions and satellite images.

Keywords: ore deposits, underground mining, disturbed lands, reclamation

For citation: Ivanov E.A., Talgamer B.L. Analysis of the structure of lands disturbed by underground mining of ore deposits. *Nauki o Zemle i nedropol'zovanie = Earth sciences and subsoil use*. 2023;46(4):413-422. (In Russ.). <https://doi.org/10.21285/2686-9993-2023-46-4-413-422>. EDN: WULGWZ.

Введение

Проблема рекультивации нарушенных горными предприятиями территорий актуальна многие годы¹⁻³. Остро стоит данный вопрос и в настоящее время, так как при добыче полезных ископаемых используется большое количество земель, происходит уничтожение почвенного слоя и изменение рельефа местности⁴ [1].

Материалы и методы исследования

В связи с актуальностью озвученной проблемы в ходе проведенного исследования на горнодобывающих предприятиях, осуществляющих подземную разработку на рудных месторождениях, с помощью средств измерения и визуальным методом исследованы объекты, непосредственно относящиеся к процессу добычи и дальнейшей переработки руды: отвалы, пруды-отстойники, хвостохранилища, промплощадки и др.

При открытой разработке месторождений большая часть нарушенных земель представлена карьерами и отвалами пустых пород. Нарушенные земли в целом по предприятию имеют примерно следующую структуру: на незасыпанные карьерные выработки приходится порядка 47 %, внутренние отвалы занимают около 12 %, внешние отвалы – 30 % и около 10 % занимают прочие участки [2, 3]. В специальной литературе, связанной с открытыми горными работами, достаточно детально установлены требования к параметрам рекультивации [4–8], хотя пределы изменения этих параметров обоснованы не по всем направлениям.

Вопросам рекультивации нарушенных земель после подземной разработки в специальной литературе уделено гораздо меньше внимания [9–12]. Можно предположить, что при этом способе разработки нарушенных территорий должно быть значительно меньше, однако фактически это не всегда так [13–15]. Земли занимают под промышленные площадки, устья штолен, шахтные копры, ремонтные базы, отвалы, дороги и т. д. [16–20].

Для анализа нарушенных земель выбрано четыре горнодобывающих предприятия Восточной Сибири («Рудник 1» – «Рудник 4»), специализирующихся на подземной разработке рудных месторождений.

Разработка месторождения, расположенного в Республике Бурятия, предприятием «Рудник 1» началась в 1998 году. Последний из технических проектов был выполнен в 2020 году. Работы планируется вести до 2025 года. В схеме вскрытия участвует вертикальный ствол «Главный», пройденный до горизонта +1290 м. Для отработки нижележащих запасов предусмотрены спиральные съезды до горизонта +900 м. Общая глубина разработки месторождения составляет 1400 м. Максимальная производственная мощность по добыче руды – 210 тыс. т. Балансовые запасы золота и серебра утверждены по категориям C1 и C2.

Горнодобывающее предприятие «Рудник 2» осуществляет разработку месторождения подземным способом с 2017 года. Последний из технических проектов был выполнен в 2022 году. Разработку месторождения по данному проекту планируется выполнить до 2034 года.

¹ Чemezov В.В., Коврыжников В.Л. Землепользование и рекультивация нарушенных земель при разработке месторождений золота и алмазов: пособие по разработке проектов рекультивации нарушенных земель. Иркутск: ОАО «Иргиредмет», 2007. 330 с.

² Половников А.В. Рекультивация и мелиорация нарушенных земель: учеб. пособие. Пермь: Изд-во Пермской ГСХА, 2016. 51 с.

³ Чайкина Г.М., Обьедкова В.А. К вопросу о приоритетных направлениях и районировании рекультивации нарушенных земель: доклад на симпозиуме «Неделя горняка – 2000». Москва, МГГУ, 31 января – 4 февраля 2000 г. // Горная промышленность. 2004. № 4. С. 27–29.

⁴ Государственные доклады о состоянии и об охране окружающей среды Иркутской области. Иркутск: ООО «Мегапринт», 2017–2020.



Максимальная производственная мощность по добыче руды – 150 тыс. т. Балансовые запасы утверждены по категориям С1 и С2. Глубина отработки месторождения составляет 370 м.

На предприятии «Рудник 3» горные работы начались в 2003 году. Последний из технических проектов был выполнен в 2021 году. Разработку месторождения по данному проекту планируется произвести до 2032 года. Глубина отработки на сегодняшний день достигает 650 м. Балансовые запасы руды утверждены по категориям С1 и С2 и составляют 5033 тыс. т. Производственная мощность по добыче руды составляет 400 тыс. т.

Предприятие «Рудник 4» имеет очень богатую историю становления и развития, которая началась задолго до советского периода. Согласно последнему выполненному проекту в 2022 году, отработка балансовых запасов в количестве 5897,7 тыс. т. руды должна производиться до 2042 года. Балансовые запасы золота и серебра утверждены по категориям С1 и С2. На данный момент глубина отработки месторождения достигает 712 м. Максимальная производственная мощность по добыче руды – 350 тыс. т.

На перечисленных выше рудниках были проведены полевые исследования и сделан анализ структуры нарушенных земель (таблица).

По горнодобывающему предприятию «Рудник 1» можно сделать вывод о том, что боль-

шую площадь нарушенных земель занимает фабрика и хвосты обогащения. Значительная площадь приходится на дорожные сети, однако здесь следует учесть, что дороги и линии электропередач в дальнейшем будут использоваться для нужд местного населения, а также для геолого-разведочных работ. Большие площади заняты отвалами. На рис. 1 изображены отвалы с двух штолен, на которых самозарастание происходит медленно или же не происходит совсем. На них отмечается лишь скудная травянистая растительность и редкие деревья.

Перед формированием отвалов не был снят потенциально плодородный слой (рис. 2), что существенно усложняет рекультивацию.

Объем отвалов на предприятии невелик, так как из пустых пород формировалось дорожное полотно, в том числе и в подземных горных выработках.

Отдельно хочется отметить провалы, образующиеся на поверхности из-за применения системы разработки с магазинированием руды. Площадь провалов относительно невелика и составляет всего 1684 м² (рис. 3). Однако стоит отметить, что площадь уже образовавшегося провала может увеличиваться в связи с сильной трещиноватостью пород. Этот факт практически исключает процесс рекультивации данного участка, так как при помощи горного оборудования опасно производить работы в таких условиях.

Структура нарушенных земель на исследуемых объектах The structure of disturbed lands on the facilities under investigation

Нарушенные участки	Используемые на исследуемых объектах площади, га			
	Рудник 1	Рудник 2	Рудник 3	Рудник 4
Административно-бытовые комплексы и промплощадки	20,2	180	20	13,5
Дорожные сети	35,5	13	23	17
Открытые выработки	–	142	13,36	–
Карьер песчано-гравийных пород	–	–	2,84	–
Породные отвалы	8,13	20	–	7
Обогатительная фабрика	23	30	–	4,5
Хвосты обогащения	57,5	36,5	–	8,2
Провалы	0,2	–	0,1	–
Прочее (линии электропередач, гидротехнические сооружения и др.)	6,2	9	7	4
Итого	150,7	430,5	66,3	54,2



Рис. 1. Отвал пустых пород при штольне № 16
Fig. 1. Waste rock dump at the tunnel no. 16



Рис. 2. Отвал пустых пород при штольне № 12
Fig. 2. Waste rock dump at the tunnel no. 12



Рис. 3. Провал земной поверхности
Fig. 3. The failure of the Earth's surface



Провалы не предсказываются, не учитываются и нигде не регистрируются, однако представляют опасность в дальнейшем для местного населения и животных, а также обуславливают ряд экологических проблем, в том числе связанных с уменьшением модуля стока поверхностных вод и увеличением питания подземных вод.

По предприятию «Рудник 2» обнаружено существенное расхождение проектных и фактических данных о нарушенных площадях. Согласно проектным показателям, площадь нарушенных земель должна составлять 430,5 га, а по измерениям с использованием космоснимков (рис. 4) нарушено по меньшей мере 467,6 га, что на 37,1 га больше проектных значений. При этом разработка месторождения еще не завершена.

«Рудник 3» имеет наименьшую площадь нарушенных земель из исследуемых объек-

тов. Тем не менее на участке работ образован провал площадью 0,1 га. Анализ технического проекта по разработке месторождения показал, что рекультивация нарушенных земель в нем рассмотрена лишь номинально, поскольку этого требует нормативная документация. Нет конкретных решений по ликвидации провалов и восстановлению нарушенной территории.

Руководство рудника организовало наблюдение за провалом, но мероприятия по его ликвидации не разрабатываются.

В проектной документации по предприятию «Рудник 4» имеется экологическая характеристика объекта, а также результаты оценки его воздействия на окружающую среду, но отсутствует описание мероприятий по этапам и направлениям рекультивации нарушенных земель, также не описаны способы, технология и параметры горнотехнических работ по восстановлению поверхности.



Рис. 4. Космоснимок нарушенных земель («Рудник 2»)
Fig. 4. Satellite image of disturbed lands («Rudnik 2»)



Усредненная структура нарушенных земель по исследуемым предприятиям представлена на рис. 5.

Установленная структура нарушенных земель при подземной разработке рудных месторождений существенно отличается от таковой при открытых горных работах. Как следует из диаграммы (см. рис. 5), большую часть нарушенных земель при подземной разработке занимают бытовые комплексы и промплощадки. В целом же количество нарушенных земель при подземной добыче руды существенно меньше, чем при использовании карьеров, однако степень воздействия на окружающую среду также остается достаточно высокой.

Результаты исследования и их обсуждение

Анализ четырех проектов подземной разработки рудных месторождений выявил отсутствие в них детального прогнозирования воздействия горных работ на земельные ресурсы и конкретных технологических решений по рекультивации нарушенных площадей с указанием объемов земляных работ, плана их выполнения, используемого оборудования и рекомендуемых технологических схем восстановления поверхности. При этом фактические площади нарушенных

земель на исследуемых объектах значительно отличаются от установленных проектных значений.

С целью сопоставления степени воздействия горных работ на земельные ресурсы при подземной и открытой разработке рудных месторождений был сделан анализ проектной документации 10 небольших карьеров, расположенных в Восточно-Сибирском и Дальневосточном федеральных округах. Производственная мощность этих карьеров составляет от 30 до 1000 тыс. т в год, глубина – до 170 м, площади нарушенных земель – от 34 до 2800 га.

Площади нарушаемых земель при открытых горных работах, как правило, растут с увеличением производственной мощности карьера, чего не отмечается при подземной разработке рудных месторождений (см. таблицу). Удельная землеемкость горных работ (соотношение площади нарушенных земель к объему добываемой руды, $\text{м}^2/\text{т}$) при открытой разработке анализируемых объектов значительно больше, чем при подземной (соответственно 2–3,1 против 0,08–2,4 $\text{м}^2/\text{т}$). При этом с уменьшением сроков разработки месторождения и увеличением глубины карьера удельная землеемкость открытых горных работ возрастает. При подземной разработке такой зависимости не наблюдается.

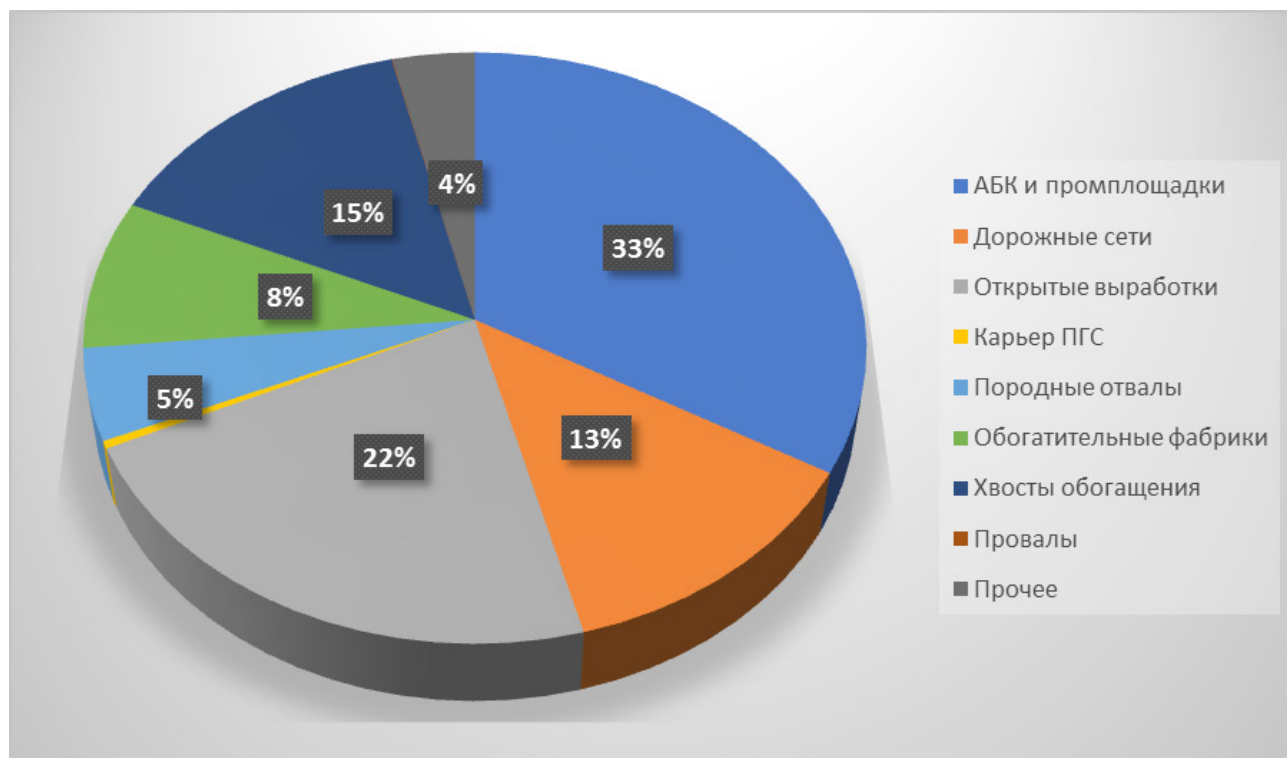


Рис. 5. Усредненная структура нарушенных земель по исследуемым предприятиям
Fig. 5. Average structure of disturbed lands by the studied enterprises



Заключение

На основе проведенного исследования можно сделать вывод о том, что при разработке месторождений подземным способом площадь нарушенных земель измеряется десятками гектаров, существенно изменяется ландшафт местности, из-за отсутствия достаточного количества рыхлых отложений (потенциально плодородных земель) усложняется процесс рекультивации. Вопросы восстановления нарушенных земель в анализируемой проектной документации по подземной разработке рудных месторождений рассмотрены весьма поверхностно, без установления

характера и площади нарушений, обоснования направлений, объемов, сроков и технологии рекультивации. Многие виды техногенного воздействия подземных горных работ на земельные ресурсы в проектной документации вообще не упоминаются (в том числе провалы), и какие-либо решения по их устранению не принимаются. С целью более полной оценки землеемкости подземных разработок рудных месторождений необходимо продолжить изучение проектной документации, расширить объем полевых исследований, обратив особое внимание на нарушенные участки, не упомянутые в проектах.

Список источников

1. Зеньков И.В., Морин А.С., Рагозина М.А., Анищенко Ю.А., Жукова В.В. Результаты исследования лесной рекультивации с посадкой ели сибирской на породных отвалах угольного разреза «Бородинский» // Уголь. 2019. № 2. С. 81–84. <https://doi.org/10.18796/0041-5790-2019-2-81-84>. EDN: YVOVSP.
2. Баянова А.А. Мониторинг восстановления нарушенных земель в Иркутской области // Астраханский вестник экологического образования. 2018. № 2. С. 95–99. EDN: YWQMFT.
3. Корнилов С.В., Антонинова Н.Ю., Шубина Л.А., Славиковская Ю.О. Экологические аспекты выбора направления рекультивации при отработке месторождений полезных ископаемых // Горный информационно-аналитический бюллетень (научно-технический журнал). 2021. № 5-2. С. 218–230. https://doi.org/10.25018/0236_14_93_2021_52_0_218. EDN: TUVOLP.
4. Лубенская Н.А., Чмыхалова С.В., Гришин В.Ю. Предпосылки для формирования и развития рынка услуг по рекультивации нарушенных земель // Горный информационно-аналитический бюллетень (научно-технический журнал). 2021. № 10-1. С. 88–100. https://doi.org/10.25018/0236_1493_2021_101_0_88. EDN: WUDIXP.
5. Гуман О.М., Макаров А.Б., Гревцев Н.В., Вегнер-Козлова Е.О. Особенности инженерно-экологических исследований для рекультивации нарушенных земель в горнодобывающих регионах // Известия высших учебных заведений. Горный журнал. 2020. № 2. С. 68–76. <https://doi.org/10.21440/0536-1028-2020-2-68-76>. EDN: EQPIC1.
6. Азизхонов И.М., Тальгамер Б.Л., Усмонов Н.К. Оценка способов и результатов опробования эфелей и отвалов на рудном месторождении // Науки о Земле и недропользование. 2022. Т. 45. № 1. С. 80–89. <https://doi.org/10.21285/2686-9993-2022-45-1-80-89>. EDN: CRGOUU.
7. Колопац С.К. Природоохранные аспекты закрытия шахт за рубежом // Вісник Дніпропетровського університету. Серія: геологія. географія. 2016. Т. 24. № 2. С. 47–54. <https://doi.org/10.15421/111632>.
8. Игнатьева М.Н., Юрак В.В., Душин А.В. Правовое регулирование рекультивационных работ при недропользовании: международный обзор // ЭКО. 2021. № 12. С. 140–160. <https://doi.org/10.30680/ECO0131-7652-2021-12-140-160>. EDN: CZXFDR.
9. Цешковская Е.А., Голубева Е.И., Цой Н.К., Оралова А.Т., Матонин В.В. Геоэкологические аспекты рекультивации нарушенных земель в Карагандинской области (республика Казахстан) // Вестник Московского университета. Серия 5. География. 2019. № 4. С. 73–80. EDN: ZQEUAD.
10. Петин А.Н., Толстомятова О.С., Петина М.А. Проблемы рекультивации земель, нарушенных горнодобывающим комплексом: российский и зарубежный опыт // Sciences of Europe. 2017. № 13-1. С. 28–31. EDN: YKVOTL.
11. Бобко К.И., Петрова Т.В. Механизмы обеспечения и контроля проведения рекультивации в разрезе мирового опыта // Горный информационно-аналитический бюллетень (научно-технический журнал). 2015. № 3. С. 271–280. EDN: TJYGGP.
12. Игнатченко П.П., Сальникова Ю.М. Сравнение зарубежного и отечественного опыта рекультивации нарушенных земель. Восстановление нарушенных земель в Ленинградской области // Естественные науки: актуальные вопросы и социальные вызовы: материалы IV Междунар. науч.-практ. конф. (г. Астрахань, 26 ноября 2021 г.). Астрахань, 2021. С. 83–87.
13. Тальгамер Б.Л., Мурзин Н.В., Рославцева Ю.Г., Семенов М.Е. Обоснование углов выполаживания нарушенных земель при природоохранной рекультивации карьеров в рыхлых отложениях // Горный информационно-



аналитический бюллетень (научно-технический журнал). 2021. № 3. С. 128–141. <https://doi.org/10.25018/0236-1493-2021-3-0-128-141>. EDN: ANAGBA.

14. Тальгамер Б.Л., Галайда К.П. Исследование условий самозарастания нарушенных земель при добыче строительного камня // Геонауки – 2020: материалы Междунар. науч.-техн. конф. (г. Иркутск, 21–25 мая 2020 г.). Иркутск, 2020. Т. 20. С. 172–178. EDN: NUIVFD.

15. Овешников Ю.М., Рязанцев С.С. Рациональное использование земельных отвалов путем оптимизации параметров отвалообразования на рудных карьерах // Горный информационно-аналитический бюллетень (научно-технический журнал). 2011. № 4. С. 97–101. EDN: ONBMBX.

16. Андроханов В.А., Берлякова О.Г. Состояние лесных культур и почвенного покрова на рекультивируемом отвале угольного разреза // Сибирский лесной журнал. 2016. № 2. С. 22–31. <https://doi.org/10.15372/SJFS20160202>. EDN: VXVYRD.

17. Pratiwi P., Narendra B.H., Siregar C.A., Turjaman M., Hidayat A., Rachmat H.H., et. al. Managing and reforesting degraded post-mining landscape in Indonesia: a review // Land. 2021. Vol. 10. Iss. 6. P. 658. <https://doi.org/10.3390/land10060658>.

18. Tymchuk I., Malovanyy M., Shkivirko O., Chornomaz N., Popovych O., Grechanik R., et al. Review of the global experience in reclamation of disturbed lands // Ecological Engineering & Environmental Technology. 2021. Iss. 22. P. 24–30. <https://doi.org/10.12912/27197050/132097>.

19. Cheng L., Skousen J.G. Comparison of international mine reclamation bonding systems with recommendations for China // International Journal of Coal Science & Technology. 2017. Vol. 4. P. 67–79. <https://doi.org/10.1007/s40789-017-0164-3>.

20. Malieiev Y.V. Modern methods of reclamation of disturbed land landscape in terms of open-pit mining of horizontal deposits // Геотехнічна механіка. 2017. № 132. С. 1–8.

References

1. Zenkov I.V., Morin A.S., Ragozina M.A., Anishenko Yu.A., Zhukova V.V. The results of the study of forest recultivation with the planting of Siberian spruce on the rock dumps of the “Borodinskiy” open-pit mine. *Ugol’*. 2019;2:81-84. (In Russ.). <https://doi.org/10.18796/0041-5790-2019-2-81-84>. EDN: YVOVSP.

2. Bayanova A.A. Monitoring of recovery of disturbed land in the Irkutsk region. *Astrakhanskii vestnik ehkologicheskogo obrazovaniya = Astrakhan Bulletin of Ecological Education*. 2018;2:95-99. (In Russ.). EDN: YWQMFT.

3. Kornilov S.V., Antoninova N.Yu., Shubina L.A., Slavikovskaya Yu.O. Ecological aspects of choosing a recultivation scenario in mineral mining. *Gornyi informatsionno-analiticheskii byulleten’ (nauchno-tehnicheskii zhurnal) = Mining Informational and Analytical Bulletin (Scientific and Technical Journal)*. 2021;5:218-230. (In Russ.). https://doi.org/10.25018/0236_1493_2021_52_0_218. EDN: TUVOLP.

4. Lubenskaya N.A., Chmychalova S.V., Grishin V.YU. Preconditions for the formation and development of the market for services for the remediation of disturbed lands. *Gornyi informatsionno-analiticheskii byulleten’ (nauchno-tehnicheskii zhurnal) = Mining Informational and Analytical Bulletin (Scientific and Technical Journal)*. 2021;10:88-100. (In Russ.). https://doi.org/10.25018/0236_1493_2021_101_0_88. EDN: WUDIXP.

5. Guman O.M., Makarov A.B., Grevtsev N.V., Vegner-Kozlova E.O. Features of engineering and environmental research for disturbed lands restoration in mining regions. *Izvestiya vysshikh uchebnykh zavedenii. Gornyi zhurnal = Minerals and Mining Engineering*. 2020;2:68-76. (In Russ.). <https://doi.org/10.21440/0536-1028-2020-2-68-76>. EDN: EQPICl.

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

7. Kolopats S.K. Environmental aspects of mine closures abroad. *Vestnik Dnepropetrovskogo universiteta. Seriya: geologiya, geografiya = Dnipropetrovsk University Bulletin. Series: geology, geography*. 2016;24(2):47-54. (In Russ.). <https://doi.org/10.15421/111632>.

8. Ignatyeva M.N., Yurak V.V., Dushin A.V. Legislation on subsoil recultivation following the use of subsurface resources: an international review. *EKO = ECO*. 2021;12:140-160. (In Russ.). <https://doi.org/10.30680/ECO0131-7652-2021-12-140-160>. EDN: CZXFDR.

9. Tsheshkovskaya Ye.A., Golubeva E.I., Tsoy N.K., Oralova A.T., Matonin V.V. Geoecological aspects of disturbed lands reclamation in the Karaganda region (the republic of Kazakhstan). *Vestnik Moskovskogo universiteta. Seriya 5. Geografiya = Lomonosov Geography Journal*. 2019;4:73-80. (In Russ.). EDN: ZQEUAD.

10. Petin A.N., Tolstopyatova O.S., Petina M.A. Problems of reclamation of lands disturbed by mining complex, the Russian and foreign experience. *Sciences of Europe*. 2017;13:28-31. (In Russ.). EDN: YKVOTL.



11. Bobko K.I., Petrova T.V. Mechanisms of land reclamation implementation and control in the world experience. *Gornyi informatsionno-analiticheskii byulleten' (nauchno-tekhnicheskii zhurnal) = Mining Informational and Analytical Bulletin (Scientific and Technical Journal)*. 2015;3:271-280. (In Russ.). EDN: TJYGGP.
12. Ignatchenko P.P., Salnikova Ju.M. Comparison of foreign and domestic experience of recultivation of disturbed lands. Restoration of disturbed lands in the Leningrad region. In: *Estestvennye nauki: aktual'nye voprosy i sotsial'nye vyzovy: materialy IV Mezhdunar. nauch.-prakt. konf. = Natural sciences: current issues and social challenges: materials of the 4th International scientific and practical conference*. 26 November 2021, Astrakhan. Astrakhan; 2021, p. 83-87. (In Russ.).
13. Talgamer B.L., Murzin N.V., Roslavtseva YU.G., Semenov M.E. Cutback angles for slope flattening during rehabilitation of degraded landscape due to open pit mining in friable sediments. *Gornyi informatsionno-analiticheskii byulleten' (nauchno-tekhnicheskii zhurnal) = Mining Informational and Analytical Bulletin (Scientific and Technical Journal)*. 2021;3:128-141. (In Russ.). <https://doi.org/10.25018/0236-1493-2021-3-0-128-141>. EDN: ANAGBA.
14. Talgamer B.L., Galayda K.P. Study of self-organized vegetation conditions of disturbed lands under building stone mining. In: *Geonauki – 2020: materialy Mezhdunar. nauch.-tekhn. konf. = Geosciences – 2020: materials of the International scientific and technical conference*. 21–25 May 2020, Irkutsk. Irkutsk; 2020, vol. 20, p. 172-178. EDN: NUIVFD.
15. Oveshnikov YU.M., Ryazantsev S.S. Rational use of land allotments by optimizing dumping parameters in ore quarries. *Gornyi informatsionno-analiticheskii byulleten' (nauchno-tekhnicheskii zhurnal) = Mining Informational and Analytical Bulletin (Scientific and Technical Journal)*. 2011;4:97-101. EDN: ONBMBX.
16. Androkhanov V.A., Berlyakova O.G. Condition of forest crops and soil cover at reclaimed dump of coal mine. *Sibirskii lesnoi zhurnal = Siberian Journal of Forest Science*. 2016;2:22-31. (In Russ.). <https://doi.org/10.15372/SJFS20160202>. EDN: VXVYRD.
17. Pratiwi P., Narendra B.H., Siregar C.A., Turjaman M., Hidayat A., Rachmat H.H., et. al. Managing and reforesting degraded post-mining landscape in Indonesia: a review. *Land*. 2021;10(6):658. <https://doi.org/10.3390/land10060658>.
18. Tymchuk I., Malovanyy M., Shkivirko O., Chornomaz N., Popovych O., Grechanik R., et al. Review of the global experience in reclamation of disturbed lands. *Ecological Engineering & Environmental Technology*. 2021;22:24-30. <https://doi.org/10.12912/27197050/132097>.
19. Cheng L., Skousen J.G. Comparison of international mine reclamation bonding systems with recommendations for China. *International Journal of Coal Science & Technology*. 2017;4:67-79. <https://doi.org/10.1007/s40789-017-0164-3>.
20. Malieiev Y.V. Modern methods of reclamation of disturbed land landscape in terms of open-pit mining of horizontal deposits. *Geotekhnicheskaya mekhanika*. 2017;132:1-8.

Информация об авторах / Information about the authors



Иванов Евгений Александрович,
аспирант,
Институт недропользования,
Иркутский национальный исследовательский технический университет,
г. Иркутск, Россия,
✉ ugienjohnn@mail.ru
<https://orcid.org/0009-0009-6401-3357>

Evgeny A. Ivanov,
Postgraduate Student,
Institute of Subsoil Use,
Irkutsk National Research Technical University,
Irkutsk, Russia,
✉ ugienjohnn@mail.ru
<https://orcid.org/0009-0009-6401-3357>



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

**Boris L. Talgamer,**

Dr. Sci. (Eng.), Professor,

Head of the Department of Mineral Deposit Development,

Institute of Subsoil Use,

Irkutsk National Research Technical University,

Irkutsk, Russia,

go_gor@istu.edu

<https://orcid.org/0000-0003-1413-0116>**Вклад авторов / Contribution of the authors**

Все авторы сделали эквивалентный вклад в подготовку публикации.

The authors contributed equally to this article.

Конфликт интересов / Conflict of interests

Авторы заявляют об отсутствии конфликта интересов.

The authors declare no conflicts of interests.

*Все авторы прочитали и одобрили окончательный вариант рукописи.**The final manuscript has been read and approved by all the co-authors.***Информация о статье / Information about the article**

Статья поступила в редакцию 28.09.2023; одобрена после рецензирования 16.10.2023; принята к публикации 19.11.2023.

The article was submitted 28.09.2023; approved after reviewing 16.10.2023; accepted for publication 19.11.2023.

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

Научная статья

УДК 502/504+550.4+550.8.05

EDN: CSSVLQ

DOI: 10.21285/2686-9993-2023-46-4-423-431

**Анализ пространственно-временной изменчивости
параметров снежного покрова по системе профилей
на урбанизированной территории****А.В. Ланько^{a✉}, Г.И. Сарапулова^b**^{a-с}*Иркутский национальный исследовательский технический университет, г. Иркутск, Россия*

Резюме. Цель данного исследования заключалась в анализе пространственно-временной изменчивости параметров снежного покрова на урбанизированной территории г. Иркутска и примыкающих районов по системе профилей, отражающих особенности микрорельефа местности. Полевые обследования проводились в соответствии с общепринятыми рекомендациями по проведению снегогеохимических съемок. Отбор проб снега производился на всю глубину залегания за исключением слоя снежного покрова толщиной 0,5–1 см от почвы. Точки отбора проб располагались на расстоянии не менее 25 м от дорог. В жилых массивах города пробы отбирались в местах, где снежный покров не нарушен, а посторонние наносы и свалки отсутствуют. Для проведения статистического анализа и построения моделей разрезов по профилям, а также получения схем распределения параметров снежного покрова использовалось программное обеспечение Global Mapper, Golden Software Surfer, Statistica. Получена 3D-модель рельефа по данным радарной топографической съемки, которая выявила сложнопеременный тип рельефа исследуемой территории. В нем присутствуют горы, плоские возвышенности с волнисто-равнинными пологими водоразделами, пади, ложбины и понижения. Перепад высот составляет до 230 м. С учетом профилей получены схемы распределения высоты снежного покрова, которые позволили выявить наиболее заснеженные участки территории. Проведен геохимический анализ фильтрата талой снежной воды за трехлетний период. В 2021 г. для содержаний вольфрама, натрия, брома, кальция, молибдена, серы, бария, магния, сурьмы, тантала, цезия, титана, хрома, кремния выявлена высокая корреляция с электропроводностью. Средний уровень корреляции с электропроводностью обнаружен для мышьяка, меди, свинца. В 2022 г. выявлена удовлетворительная корреляция между кальцием, магнием, мышьяком и электропроводностью. Полученные данные анализа свидетельствуют о разном уровне загрязнения территории в результате атмосферных выпадений в эти годы, что связано с производственной активностью промышленных объектов. Выявлены схемы распределения показателя pH снега. Показано, что зоны с pH < 6 приурочены в большей степени к Иркутскому алюминиевому заводу. Зоны с pH > 6 обусловлены влиянием энергетических установок на углеводородном топливе: бензине, керосине, мазуте, дизельном топливе, угле. Проведены полевые и лабораторные исследования снежного покрова с использованием геоинформационных технологий и физико-химических методов. Выявлены распространение и миграция загрязняющих веществ в различных пространственно-временных масштабах в зависимости от рельефа местности. Это открывает возможности для моделирования строения ландшафта с учетом метеорологических параметров, фенологических процессов и состояния снежного покрова для целей народного хозяйства, размещения и строительства объектов.

Ключевые слова: снежный покров, микрорельеф, химические элементы, электропроводность, талая вода, pH, геоинформационные технологии

Для цитирования: Ланько А.В., Сарапулова Г.И. Анализ пространственно-временной изменчивости параметров снежного покрова по системе профилей на урбанизированной территории // Науки о Земле и недропользование. 2023. Т. 46. № 4. С. 423–431. <https://doi.org/10.21285/2686-9993-2023-46-4-423-431>. EDN: CSSVLQ.

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

Original article

Spatial and temporal variability analysis of snow cover
parameters according to the urbanized area profile systemAnna V. Lanko^{a✉}, Galina I. Sarapulova^b^{a-c}Irkutsk National Research Technical University, Irkutsk, Russia

Abstract. The purpose of the study is to analyze the spatial and temporal variability of snow cover parameters in the urbanized area of the city of Irkutsk and its adjacent areas according to the system of profiles reflecting the features of the area microrelief. Field surveys were conducted in accordance with standard recommendations for snow and geochemical surveys. Snow sampling was carried out at the entire snow depth, with the exception of the snow depth of 0.5-1 cm. Sampling points located at least 25 meters away from the roads. Snow sampling in the residential areas of the city was carried out in the places with undisturbed snow cover and free from extraneous snow banks and landfills. Global Mapper, Golden Software Surfer, Statistica software were used to carry out statistical analysis, build the models of profile sections and obtain the diagrams of snow cover parameter distribution. A 3D relief model was obtained on the basis of radar topographic survey data, which revealed a multiple formation relief of the studied area featuring mountains, high plains with undulating flat gently sloping watersheds, valleys, hollows and depressions. The height difference is up to 230 m. The diagrams of snow depth distribution built with regard to the profiles made it possible to identify the territories with the deepest snow cover. A geochemical analysis of the melt water filtrate was carried out over a three-year period. In 2021 a high correlation with electrical conductivity was found for the contents of tungsten, sodium, bromine, calcium, molybdenum, sulfur, barium, magnesium, antimony, tantalum, cesium, titanium, chromium, and silicon. The average correlation level with electrical conductivity was recorded for arsenic, copper, and lead. The analysis data obtained indicate a different contamination level of the area as a result of atmospheric precipitation in those years due to the activity of industrial facilities. The distribution patterns of the pH snow index have been revealed. It is shown that zones with pH<6 are mostly confined to the Irkutsk aluminum smelter. The zones with pH >6 are caused by the influence of the power plants using hydrocarbon fuels: gasoline, kerosene, fuel oil, diesel fuel, coal. The snow cover was subjected to field and laboratory studies using GIS technologies and physico-chemical methods. The distribution and migration of pollutants in various spatial and temporal aspects have been revealed taking into account the terrain relief. The conducted study opens up opportunities for modeling the landscape structure, taking into account meteorological parameters, phenological processes and snow cover state for the purposes of the national economy and the location of construction of various facilities.

Keywords: snow cover, microrelief, chemical elements, electrical conductivity, melt water, pH, GIS technologies

For citation: Lanko A.V., Sarapulova G.I. Spatial and temporal variability analysis of snow cover parameters according to the urbanized area profile system. *Nauki o Zemle i nedropol'zovanie = Earth sciences and subsoil use*. 2023;46(4):423-431. (In Russ.). <https://doi.org/10.21285/2686-9993-2023-46-4-423-431>. EDN: CSSVLQ.

Введение

По мере увеличения темпов урбанизации качество жизни в крупнейших городах все больше зависит от сохранения компонентов природной среды [1]. Урбанизационные процессы, воздействуя на городскую среду, оказывают уникальное влияние на формирование снежного покрова [2]. Увеличение городской застройки и рост инфраструктуры влечет за собой изменение климатических параметров, таких как температура поверхности, влажность, ветер и другие факторы, формирующие высоту и геохимический состав снежного покрова, что в свою очередь приводит к изменениям его параметров. Эко-

лого-геохимический анализ снежного покрова создает возможность для исследования загрязнений природной среды в условиях урбанизации [3–6]. При этом понимание процессов, происходящих в снеге в различных условиях рельефа, также открывает возможности для моделирования процессов распределения загрязнения атмосферного воздуха на основе метеорологических параметров [7]. Параметризация снежного покрова весьма актуальна для построения моделей различного уровня с учетом локальных и региональных особенностей его распределения [8]. Региональный критерий заключается в отнесении промышленных регионов и урбанизированных



территорий к зонам с наибольшей подверженностью и невыясненным особенностям накопления снега в условиях конкретной местности и ландшафтов [9–12]. Это позволяет не только совершенствовать принципы геоинформационного обеспечения геоэкологического картографирования регионального уровня, но и разрабатывать систему глобального геоэкологического мониторинга природных геосистем.

Цель проведенного исследования заключалась в выявлении особенностей распределения снежного покрова и изменчивости его параметров на урбанизированной территории г. Иркутска и примыкающих районов по системе профилей, отражающих особенности микрорельефа местности.

К задачам исследования можно отнести следующее:

- построить цифровую модель рельефа местности по данным радарной топографической съемки для климатической и физико-географической характеристики района исследований;
- построить разрезы микрорельефа в соответствии с заданной системой профилей с использованием геоинформационных приложений, программное обеспечение (ПО) – Global Mapper и Golden Software Surfer;
- проанализировать факторы простран-

ственно-временной организации и динамику снежного покрова на урбанизированной территории.

Материалы и методы исследования

Территорией исследования являлся Свердловский район г. Иркутска и прилегающие к нему районы. Исследования снежного покрова проводились с 2021 по 2023 гг. За это время было отобрано более 300 проб. Пробы отбирались в период максимального снегонакопления до наступления снеготаяния.

Методика отбора проб заключалась в отборе снежного покрова практически на всю глубину залегания за исключением слоя снежного покрова 0,5–1 см от земли, чтобы устранить случайное загрязнение проб частицами подстилающей почвы [13]. Снегогеохимические съемки проводились в соответствии с требованиями к проведению наблюдений за состоянием окружающей среды, ее загрязнением¹. Для исключения влияния механического загрязнения снега точки отбора проб располагались на расстоянии не менее 25 м от дорог (по возможности). В жилых массивах города пробы отбирались в местах, где снежный покров не нарушен и нет посторонних наносов и свалок. Для оценки пространственно-временной изменчивости параметров снежного покрова



Рис. 1. Территория исследования г. Иркутска и прилегающих районов
1 – Ново-Иркутская теплоэлектростанция; 2 – Иркутский алюминиевый завод

Fig. 1. Area under investigation of the city of Irkutsk and surrounding areas

1 – Novo-Irkutsk cogeneration plant; 2 – Irkutsk aluminum smelter

¹ Приказ Министерства природных ресурсов и экологии РФ от 30 июля 2020 г. № 524 «Об утверждении требований к проведению наблюдений за состоянием окружающей среды, ее загрязнением».



было выбрано 50 точек, на которых стабильно отбирался снег за все три года (рис. 1). Геохимический анализ проводился на основании общепринятых методик.

На изучаемой территории основным загрязнителем является топливно-энергетический комплекс, включающий теплоэлектроцентраль, различные котельные и печное отопление на каменном угле. Существенную роль в загрязнении атмосферы в районе, особенно на городских территориях, играет автотранспорт [14–18]. Наряду с газами, содержащими окислы углерода и азота, в выбросах автотранспорта отмечается большое количество свинца в солевой фазе, а также некоторых других тяжелых металлов. К числу приоритетных загрязнителей, поступающих в городскую атмосферу с отработавшими газами автомобилей, относятся кадмий, свинец, цинк, медь, никель, хром, ртуть, мышьяк. Также следует отметить, что на прилегающих территориях крупным источником загрязнения атмосферы является Иркутский алюминиевый завод, в выбросах которого ранее зафиксирован широкий круг различных химических элементов и соединений. Наиболее опасными из них являются элементы первого класса опасности – фтор и бериллий.

Результаты исследования и их обсуждение

На перемещение и рассеивание вредных веществ, выбрасываемых в атмосферу, влияют не только ветровой режим и температура воздуха, но и в неменьшей степени рельеф местности [19]. Построенная 3D-модель рельефа в ПО Golden Software Surfer по данным радарной топографической съемки, полученных с помощью ПО Global Mapper, показала, что рельеф в пределах исследуемой территории сложнопеременный. В нем присутствуют горы, плоские возвышенности с волнисто-равнинными пологими водоразделами, пади, ложбины и понижения. Перепад высот составляет до 230 м (рис. 2, а).

С учетом таких факторов, как роза ветров и расположение основных источников загрязнения (теплоэлектроцентраль и Иркутский алюминиевый завод), была определена система профилей (рис. 2, б), отражающая особенности микрорельефа местности. От этих особенностей также зависели направление и длина каждого профиля. Профиль 1, профиль 2 и профиль 3 проходят в направлении

господствующих северо-западных ветров таким образом, что профиль 2 располагается вдоль береговой линии р. Ангары по вершинам гряды. Профиль 1 расположен справа от профиля 2 и приурочен к слабовыпуклому наклоненному склону гряды с дренирующими ложбинами, для которого характерна плотная застройка малоэтажными и высокоэтажными зданиями. Профиль 3 проходит слева от профиля 2, вдоль оси ложбины с эпизодическими застройками. Профиль 4 и профиль 5 построены вкрест протирания русла р. Ангары. Анализ таких параметров, как высота снежного покрова, водородный показатель pH и электропроводность фильтрата снеговой воды по каждому профилю, сопоставлялся с результатами изменения этих параметров на всей площади.

В ходе проведенного анализа было выявлено, что электропроводность в пробах фильтрата талой воды 2021 г. имеет высокий коэффициент корреляции со следующими химическими элементами: вольфрам, натрий, бром, кальций, молибден, сера, барий,

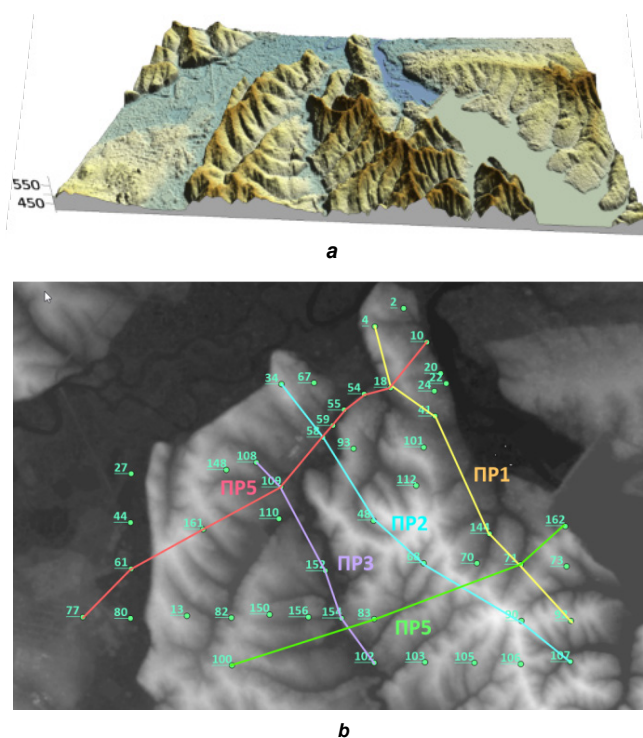


Рис. 2. Результаты моделирования местности:

а – 3D-модель рельефа, построенная по данным съемки Shuttle Radar Topography Mission;

б – система профилей

Fig. 2. Area modeling results:

а – 3D relief model built based on Shuttle Radar Topography Mission survey data;

б – profile system



магний, сурьма, тантал, цезий, титан, хром, кремний. Средний уровень корреляционной связи выявлен у мышьяка, меди, свинца. Из этого можно сделать вывод, что изменение величины электропроводности в фильтрате снеговой воды может опосредованно показать изменение содержания химических элементов.

На построенной схеме распределения высоты снежного покрова (рис. 3, а) можно заметить, что наиболее заснеженный участок расположен в юго-восточной части исследуемой территории. На диаграммах концентрации (рис. 4) эти точки обозначаются как выбросы, так как не вписываются в общую закономерность: с увеличением абсолютной высоты рельефа высота снежного покрова уменьшается. Но это вполне закономерно, учитывая, что по розе ветров преобладающими направлениями ветра в Иркутске является северо-западный (24 %), юго-восточный (15 %) и западный (15 %), а сами точки расположены на окруженных лесом опушках.

Анализ распределения снежного покрова по выделенным профилям (см. рис. 4) показал, что снег в большей степени накапливается в пониженной части рельефа. На профиле 2 при сравнении распределения высоты снежного покрова по склонам видно, что на более пологом и вытянутом склоне складывались более благоприятные условия для снегонакопления, чем на противоположном.

На схеме распределения показателя pH (см. рис. 3) можно отметить, что зоны с $\text{pH} < 6$ (относящиеся к кислотной среде) приурочены в большей степени к возможному источнику влияния – Иркутскому алюминиевому заводу. Зоны с $\text{pH} > 6$, что по литературным данным считается защелачиванием атмосферных осадков, можно отнести к источникам выбросов вредных веществ в атмосферу при работе энергетических установок, работающих на углеводородном топливе: бензине, керосине, мазуте, дизельном топливе, угле.

В 2022 г. химический анализ фильтрата талой воды проводился на девяти элементах:

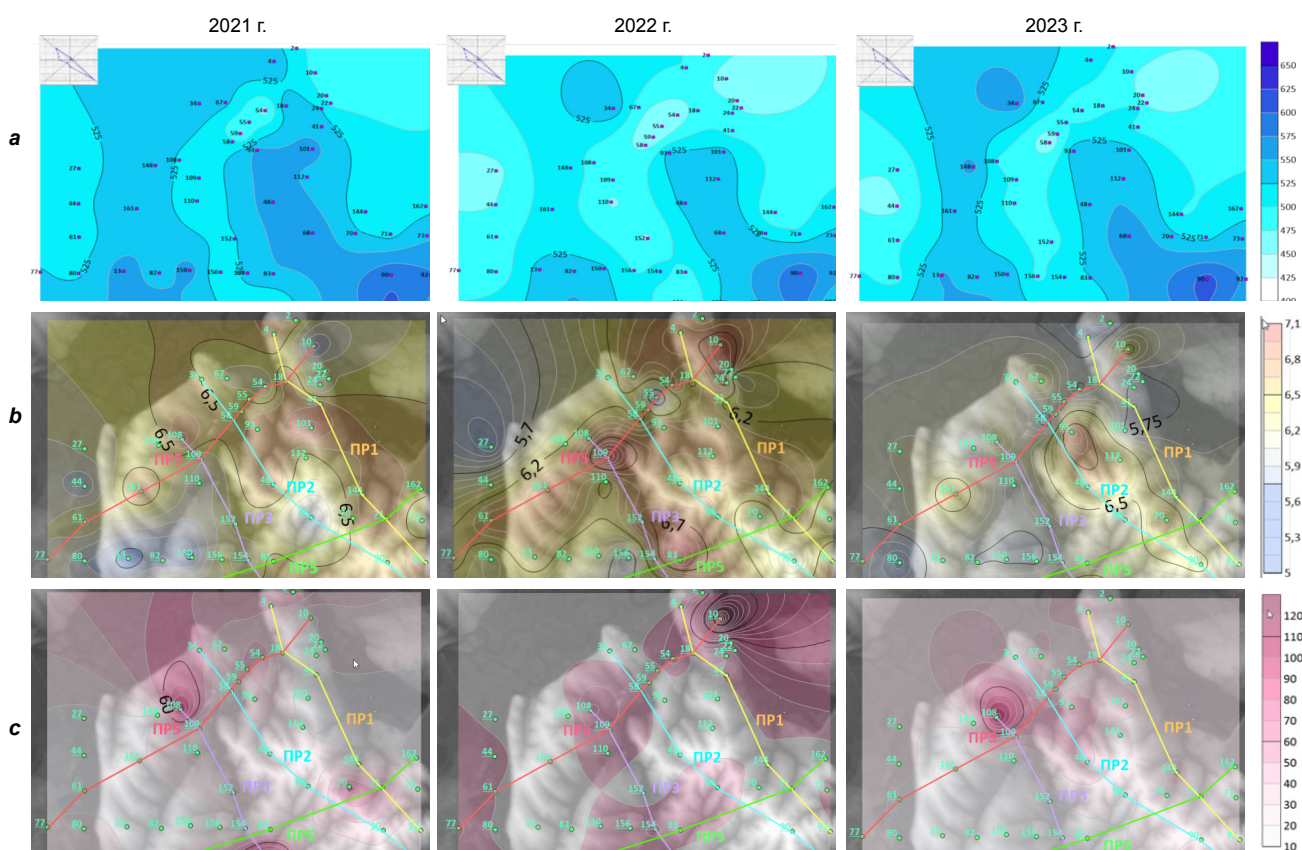


Рис. 3. Схемы распределения параметров снежного покрова:

а – высота снежного покрова с учетом абсолютной высоты рельефа; б – pH фильтрата снеговой воды; с – электропроводность фильтрата снеговой воды

Fig. 3. Diagrams of snow cover parameter distribution:

a – snow depth taking into account the absolute height of relief; б – pH of melt water filtrate; с – electrical conductivity of melt water filtrate

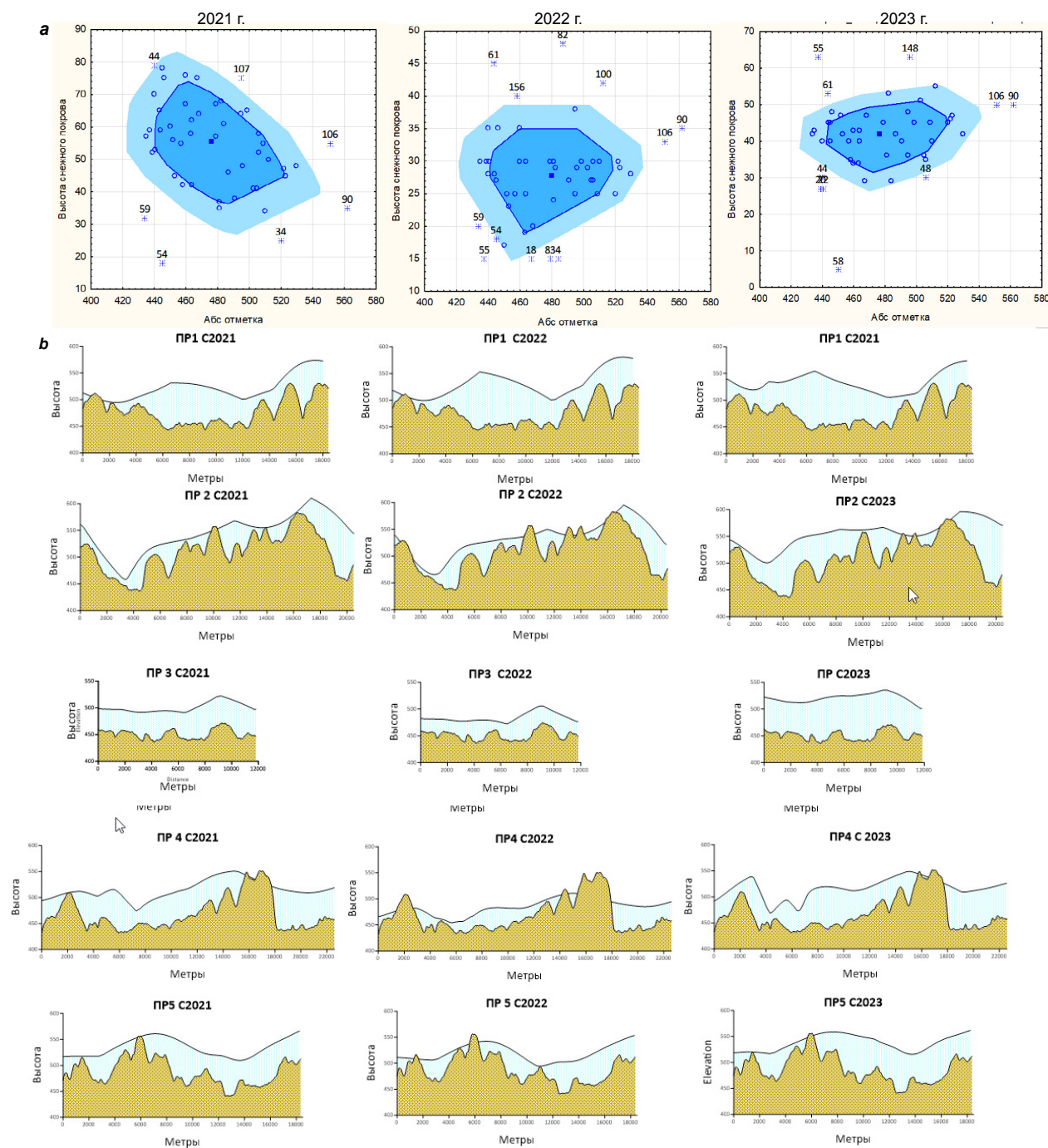


Рис. 4. Диаграммы концентрации снежного покрова (а) и разрезы по профилям (б)

Fig. 4. Snow concentration diagrams (a) and profile sections (b)

кальций, магний, натрий, кремний, цинк, калий, медь, мышьяк, свинец.

Выявлены удовлетворительные корреляции между электропроводностью и кальцием, магнием и мышьяком, что ниже, чем в 2021 г. Также корреляционный анализ показал сильную взаимосвязь между кальцием – магнием и калием – медью. Это может объясняться химическим составом атмосферных выпадений от промышленных объектов.

Так как количество осадков в 2022 г. было

меньше и отмечается более низкая скорость ветров, то это также отмечается на разрезах по проложенным профилям (см. рис. 4). Наблюдается тенденция к большему накоплению снежного покрова в пониженных частях рельефа. При этом, согласно схеме распределения значений такого показателя, как электропроводность, выявлено, что увеличение значения по всей анализируемой площади говорит о насыщении снега солями и, возможно, металлами. Распределение pH существенно



изменилось по сравнению с 2021 г. Зоны с $pH < 6$ сместились в южную сторону. При этом зоны с $pH > 6$ стали более локализованными.

В 2023 г. на схеме распределения pH можно отметить, что зоны с $pH < 6$ сконцентрированы в юго-западной части исследуемой территории с обеих сторон гряды, простирающейся с севера на юго-запад (см. рис. 3). Еще одна зона расположена вдоль береговой линии р. Ангары. Зоны с $pH > 6$ из ложбины сместились на вершину гряды в северо-восточном направлении. Аномальное значение электропроводности выявлено в северо-западной части исследуемой территории в начале профиля 3 и приурочено к зоне с наибольшим накоплением снежного покрова (см. рис. 4).

В 2023 г. наблюдалось самое большое количество осадков за все время наблюдений. Также отмечается большая средняя скорость ветров, что и отразилось на схеме распределения снежного покрова и на диаграмме концентрации. Следует отметить наиболее равномерное распределение снежного покрова независимо от абсолютной высоты рельефа. Тем не менее, общие тенденции снегонакопления в сравнении с прошлыми годами сохранились (см. рис. 3, 4).

Полученные результаты и выявленный характер пространственно-временной изменчивости снежного покрова получен впервые для указанной территории и имеет не только научное значение, но и практическую значимость

[19, 20]. Ввиду значительной пористости и, как следствие, низкой теплопроводности снежный покров определяет температурный режим, сроки и глубину промерзания почв и грунтов, которые необходимо учитывать при строительстве и эксплуатации промышленных объектов. От толщины снега зависит количество и интенсивность поступления воды в водосборы во время снеготаяния и, следовательно, наполняемость водохранилищ, увлажненность почв и состояние грунтовых вод. Понимание процессов, происходящих в снежном покрове при различных условиях рельефа, открывает возможности для моделирования его строения на основе метеорологических параметров.

Заключение

Таким образом, проведенные полевые и лабораторные исследования, а также использование геоинформационных технологий способствуют пониманию процессов, происходящих в снежном покрове при различных погодных условиях в зависимости от рельефа местности. Это открывает возможности для моделирования его строения с учетом метеорологических параметров. Полученные результаты позволяют также обнаружить закономерности в распространении и миграции загрязняющих веществ, изменение состояния и функционирования природных систем в различных пространственно-временных масштабах.

Список источников

1. Василевич М.И. Воздействие эмиссии целлюлозно-бумажного предприятия на окружающую среду // Метеорология и гидрология. 2023. № 1. С. 112–124. <https://doi.org/10.52002/0130-2906-2023-1-112-124>. EDN: AXTKLZ.
2. Онищук Н.А., Нецветаева О.Г., Моложникова Е.В. Межгодовая динамика химического состава снежного покрова в Прибайкалье // Метеорология и гидрология. 2023. № 4. С. 33–43.
3. Мананков Н.В., Кара-Сал И.Д. Эколого-геохимическое состояние снежного покрова города Кызыла (республика Тыва) // Вестник Тувинского государственного университета. Выпуск 3. Технические и физико-математические науки. 2013. Т. 1. № 1. С. 122–129. EDN: ROMVOB.
4. Жданок А.И., Тасоол Л.Х., Чуликова С.А., Янчат Н.Н. Загрязнение снежного покрова территории г. Кызыл // Геоэкология. Инженерная геология, гидрогеология, геокриология. 2014. № 6. С. 507–517. EDN: TDUTJJ.
5. Макаров В.Н., Торговкин Н.В. Эколого-геохимическая оценка снежного покрова Якутска // Лед и Снег. 2021. Т. 61. № 3. С. 420–430. <https://doi.org/10.31857/S2076673421030098>. EDN: QSIVYI.
6. Булдакова Е.В., Заиканов В.Г., Минакова Т.Б. Принципы геоинформационного обеспечения геоэкологического картографирования регионального уровня // Геоэкология. Инженерная геология, гидрогеология, геокриология. 2014. № 4. С. 380–384. EDN: SJSXMT.
7. Голубев В.Н., Петрушина М.Н., Фролов Д.М. Закономерности формирования стратиграфии снежного покрова // Лед и Снег. 2010. № 1. С. 58–72. <https://doi.org/10.15356/2076-6734-2013-3-63-70>.
8. Китаев Л.М. Пространственно-временная изменчивость высоты снежного покрова в северном полушарии // Метеорология и гидрология. 2002. № 5. С. 28–34.
9. Комаров А.Ю. Влияние растительности и микрорельефа на стратиграфию снежного покрова в Подмоскovie // Вестник Московского университета. Серия 5. География. 2021. № 6. С. 87–98.
10. Комаров А.Ю. Строение снежного покрова на северо-востоке Московской области // Лед и Снег. 2021. Т. 61. № 3. С. 391–403. <https://doi.org/10.31857/S2076673421030096>. EDN: MQHNXL.



11. Китаев Л.М., Кислов А.В. Региональные различия снегонакопления – современные и будущие изменения (на примере Северной Европы и севера Западной Сибири) // Криосфера Земли. 2008. Т. 12. № 2. С. 98–103. EDN: JTGMXZ.
12. Ситдикова А.А., Святлова Н.В., Царева И.В. Анализ влияния выбросов автотранспорта в крупном промышленном городе на состояние загрязнения атмосферного воздуха // Современные проблемы науки и образования. 2015. № 3. С. 589.
13. Василенко В.Н., Назаров И.М., Фридман Ш.Д. Мониторинг загрязнения снежного покрова. Л.: Гидрометеиздат, 1985. 181 с.
14. Белозерцева И.А., Воробьева И.Б., Власова Н.В., Янчук М.С., Лопатина Д.Н. Химический состав снега акватории озера Байкал и прилегающей территории // География и природные ресурсы. 2017. № 1. С. 90–99. [https://doi.org/10.21782/GIPR0206-1619-2017-1\(90-99\)](https://doi.org/10.21782/GIPR0206-1619-2017-1(90-99)). EDN: YIXIEN.
15. Новикова С.А. Загрязнение атмосферы крупных городов Иркутской области выбросами автотранспортных средств // Известия Иркутского государственного университета. Серия: Науки о Земле. 2015. Т. 11. С. 64–82. EDN: TJBBTZ.
16. Ахтиманкина А.В. Загрязнение атмосферного воздуха выбросами промышленных предприятий Иркутской области // Известия Иркутского государственного университета. Серия: Науки о Земле. 2017. Т. 21. С. 15–27. EDN: ZFPJUF.
17. Гареев А.М., Галеева Э.М., Теплова Д.С. Пространственная и временная изменчивость загрязнения окружающей среды в условиях влияния городских агломераций (на примере Уфимского промышленного узла) // Вестник Академии наук Республики Башкортостан. 2018. Т. 28. № 3. С. 41–51.
18. Лисецкая Л.Г., Шаяхметов С.Ф. Оценка уровня загрязнения снежного покрова химическими соединениями и элементами на территории Шелеховского района в Восточной Сибири // Гигиена и санитария. 2022. Т. 101. № 12. С. 1443–1449. <https://doi.org/10.47470/0016-9900-2022-101-12-1443-1449>. EDN: BPWYLC.
19. Рогова В.П., Скворцов В.А., Федорова Н.В., Чурсин Д.А. Кристаллические фазы аэрозолей в природотехнических системах Прибайкалья // Известия ИГУ. Серия: Науки о Земле. 2009. Т. 2. № 2. С. 167–180. EDN: MSZMNT.
20. Козин В.В., Кузнецова Э.А. Физико-географические факторы пространственно-временной изменчивости снежного покрова нефтегазопромыслового региона: монография. Нижневартовск: Изд-во НВГУ, 2015. 151 с.

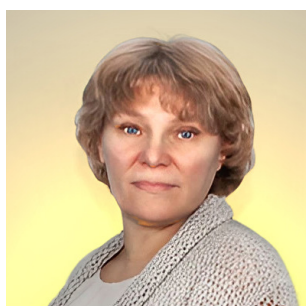
References

1. Vasilevich M.I. Environmental effects of pulp and paper mill emissions. *Meteorologiya i gidrologiya*. 2023;1:112-124. (In Russ.). <https://doi.org/10.52002/0130-2906-2023-1-112-124>. EDN: AXTKLZ.
2. Onishchuk N.A., Netsvetaeva O.G., Molozhnikova E.V. Interannual dynamics of snow cover chemical composition in the Baikal region. *Meteorologiya i gidrologiya*. 2023;4:33-43. (In Russ.).
3. Manankov A., Kara-Sal I. The ecological and geochemical condition of the snow cover in Kyzyl (republic of Tuva). *Vestnik Tuvinskogo gosudarstvennogo universiteta. Vypusk 3. Tekhnicheskie i fiziko-matematicheskie nauki*. 2013;1(1):122-129. (In Russ.). EDN: ROMVOB.
4. Zhdanok A.I., Tasool L.Kh., Chupikova S.A., Yanchat N.N. Snow cover pollution in Kyzyl territory. *Geoekologiya. Inzhenernaya geologiya, gidrogeologiya, geokriologiya*. 2014;6:507-517. (In Russ.). EDN: TDUTJJ.
5. Makarov V.N., Torgovkin N.V. Ecological and geochemical characteristics of the snow cover in the Yakutsk city (Central Siberia). *Led i Sneg = Ice and Snow*. 2021;61(3):420-430. (In Russ.). <https://doi.org/10.31857/S2076673421030098>. EDN: QSIVYI.
6. Zaikanov V.G., Minakova T.B., Buldakova E.V. Principles of GIS support of geoecological mapping for a regional level. *Geoekologiya. Inzhenernaya geologiya, gidrogeologiya, geokriologiya*. 2014;4:380-384. (In Russ.). EDN: SJSXMT.
7. Golubev V.N., Petrushina M.N., Frolov D.M. Development patterns of snow cover stratigraphy. *Led i Sneg = Ice and Snow*. 2010;1(109):58-72. (In Russ.). <https://doi.org/10.15356/2076-6734-2013-3-63-70>.
8. Kitaev L.M. Spatial and temporal variations of snow depth in the northern hemisphere. *Meteorologiya i gidrologiya*. 2002;5:28-34. (In Russ.).
9. Komarov A.Yu. The influence of vegetation cover and microrelief on snow stratigraphy in the Moscow region. *Vestnik Moskovskogo universiteta. Seriya 5, Geografiya = Lomonosov Geography Journal*. 2021;6:87-98. (In Russ.).
10. Komarov A.Yu. Snow cover stratigraphy in the northeast of Moscow region. *Led i Sneg = Ice and Snow*. 2021;61(3):391-403. (In Russ.). <https://doi.org/10.31857/S2076673421030096>. EDN: MQHNXL.
11. Kitaev L.M., Kislov A.V. Regional differences of snow accumulation – contemporary and future changes (on the example of Northern Europe and northern part of West Siberia). *Kriosfera Zemli = Earth's Cryosphere*. 2008;12(2):98-103. (In Russ.). EDN: JTGMXZ.
12. Sitdikova A.A., Svyatova N.V., Tsareva I.V. Analysis of the impact of motor vehicle emissions in the large industrial city on the state of air pollution. *Sovremennye problemy nauki i obrazovaniya = Modern problems of science and education*. 2015;3:589. (In Russ.).
13. Vasilenko V.N., Nazarov I.M., Fridman Sh.D. *Snow cover pollution monitoring*. Leningrad: Gidrometeoizdat; 1985, 181 p. (In Russ.).



14. Belozertseva I.A., Vorobyeva I.B., Vlasova N.V., Yanchuk M.S., Lopatina D.N. Chemical composition of snow in the water area of lake Baikal and on the adjacent territory. *Geografiya i prirodnye resursy = Geography and Natural Resources*. 2017;1:90-99. (In Russ.). [https://doi.org/10.21782/GIPRO206-1619-2017-1\(90-99\)](https://doi.org/10.21782/GIPRO206-1619-2017-1(90-99)). EDN: YIXIEH.
15. Novikova S.A. Pollution of atmosphere by auto transport emissions in big cities of Irkutsk region. *Izvestiya Irkutskogo gosudarstvennogo universiteta. Seriya: Nauki o Zemle = Bulletin of Irkutsk State University. Series Earth sciences*. 2015;11:64-82. (In Russ.). EDN: TJB BTZ.
16. Akhtimankina A.V. Atmospheric air pollution by industrial enterprise emissions in the Irkutsk region. *Izvestiya Irkutskogo gosudarstvennogo universiteta. Seriya: Nauki o Zemle = Bulletin of Irkutsk State University. Series Earth sciences*. 2017;21:15-27. (In Russ.). EDN: ZFPJUF.
17. Gareev A.M., Galeeva E.M., Teplova D.S. Spatiotemporal variabilities of environmental pollution under the impact of urban agglomerations: a case study of the Ufa industrial hub. *Vestnik Akademii nauk Respubliki Bashkortostan = The Herald of the ASRB*. 2018;28(3):41-51. (In Russ.).
18. Lisetskaya L.G., Shayakhmetov S.F. Assessment of the level of pollution of the snow cover with chemical compounds and elements in the territory of the Shelekhov district in Eastern Siberia. *Gigiena i sanitariya = Hygiene and Sanitation*. 2022;101(12):1443-1449. (In Russ.). <https://doi.org/10.47470/0016-9900-2022-101-12-1443-1449>. EDN: BPWYLC.
19. Rogova V.P., Skvortsov V.A., Fedorova N.V., Chursin D.T. The solid aerosol particles are in the natural-technical systems of the CisBaikal. *Izvestiya Irkutskogo gosudarstvennogo universiteta. Seriya: Nauki o Zemle = Bulletin of Irkutsk State University. Series Earth sciences*. 2009;2(2):167-180. (In Russ.). EDN: MSZMNT.
20. Kozin V.V., Kuznetsova E.A. *Physical and geographical factors of spatiotemporal variability of snow cover in the oil and gas producing region*. Nizhnevartovsk: Nizhnevartovsk State University; 2015, 151 p. (In Russ.).

Информация об авторах / Information about the authors



Ланько Анна Викторовна,
руководитель департамента образовательных технологий,
институт «Сибирская школа геонаук»,
Иркутский национальный исследовательский технический университет,
г. Иркутск, Россия,
✉ lav@geo.istu.edu

Anna V. Lanko,
Head of the Department of Educational Technology,
Siberian School of Geosciences,
Irkutsk National Research Technical University,
Irkutsk, Russia,
✉ lav@geo.istu.edu



Сарапулова Галина Ибрагимовна,
профессор кафедры обогащения полезных ископаемых
и охраны окружающей среды им. С.Б. Леонова,
Институт недропользования,
Иркутский национальный исследовательский технический университет,
г. Иркутск, Россия,
sara131@mail.ru

Galina I. Sarapulova,
Professor of the Department of Mineral Processing
and Environmental Protection named after S.B. Leonov,
Institute of Subsoil Use,
Irkutsk National Research Technical University,
Irkutsk, Russia,
sara131@mail.ru

Вклад авторов / Contribution of the authors

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

Конфликт интересов / Conflict of interests

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

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

Информация о статье / Information about the article

Статья поступила в редакцию 19.09.2023; одобрена после рецензирования 27.10.2023; принята к публикации 23.11.2023.

The article was submitted 19.09.2023; approved after reviewing 27.10.2023; accepted for publication 23.11.2023.

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

Краткое сообщение

УДК 504.5

EDN: PYLLUR

DOI: 10.21285/2686-9993-2023-46-4-432-444

Первые результаты применения методов обогащения
полезных ископаемых для извлечения металлов
из техногенно загрязненных почвогрунтов с существенным
содержанием органического веществаВ.В. Трусова^{a,✉}, О.Л. Качор^b, А.С. Алексеев^c, А.В. Паршин^d^{a,b,d}Иркутский национальный исследовательский технический университет, г. Иркутск, Россия^{a,c,d}Институт геохимии им. А.П. Виноградова СО РАН, г. Иркутск, Россия^cИркутский научно-исследовательский институт благородных и редких металлов и алмазов,
г. Иркутск, Россия

Резюме. Цель данной работы заключалась в представлении результатов исследования по применению обогащательных методов в отношении опасных отходов объекта накопленного вреда – промплощадки бывшего завода по производству аккумуляторов ОАО «Востсибэлемент», расположенного в г. Свирске Иркутской области. В рамках ранее проведенных исследований было установлено, что почвогрунт на территории промплощадки содержит значительные содержания тяжелых металлов и мышьяка, превышающие нормативные показатели в сотни и тысячи раз, что обуславливает его высокий класс опасности – II и III. Для снижения класса опасности и уменьшения объема опасных отходов предложено использовать рекуперативный подход, заключающийся в извлечении некоторых металлов и мышьяка с дальнейшим их вовлечением в хозяйственный оборот. Для гравитационного извлечения металлов и мышьяка были использованы винтовой сепаратор, концентрационный стол и центробежный концентратор. Наилучшие результаты были получены с использованием концентрационного стола: обогащение на концентрационном столе позволило увеличить содержание свинца в концентрате в 22 раза по сравнению с содержанием в исходной пробе, мышьяка – в 7,7 раза, железа – в 16,7 раза. Магнитное обогащение промпродукта концентрационного стола позволило получить концентрат с высоким содержанием и извлечением железа, меди и цинка. Несмотря на то что в отличие от руд отход в виде почвогрунта включает значительное количество органического вещества, показана возможность успешного извлечения металлов и значительное снижение их концентраций в почвогрунте. На основе полученных данных сформулированы предложения по дальнейшей схеме переработки отходов.

Ключевые слова: рекультивация, техногенные отходы, методы обогащения руд, техногенное месторождение, объект накопленного вреда, загрязнение, свинец

Для цитирования: Трусова В.В., Качор О.Л., Алексеев А.С., Паршин А.В. Первые результаты применения методов обогащения полезных ископаемых для извлечения металлов из техногенно загрязненных почвогрунтов с существенным содержанием органического вещества // Науки о Земле и недропользование. 2023. Т. 46. № 4. С. 432–444. <https://doi.org/10.21285/2686-9993-2023-46-4-432-444>. EDN: PYLLUR.



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

Brief report

**First results of using mineral concentration methods
for metal recover from technogenically contaminated soils
with significant organic concentrations**

Valentina V. Trusova^{a✉}, Olga L. Kachor^b, Ayaal S. Alekseev^c, Alexander V. Parshin^d

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

^{a,c,d}A.P. Vinogradov Institute of Geochemistry SB RAS, Irkutsk, Russia

^cIrkutsk Research Institute of Precious and Rare Metals and Diamonds, Irkutsk, Russia

Abstract. The purpose of the article is to present the research results on the application of concentration methods to hazardous waste from the industrial site of the former Vostsibelement battery plant located in the town of Svirsk, Irkutsk region (Russia), which is the facility of accumulated environmental damage. The previous studies have identified significant contents of heavy metals and arsenic that exceed standard values by hundreds and thousands of times in the industrial site soils. This fact determines soil high hazard class – II and III. To reduce the hazard class and decrease the volume of hazardous waste it is proposed to use a recuperative approach, that means to recover some metals and arsenic in order to return them in economic circulation. A spiral concentrator, a shaking table and a centrifugal concentrator were used for gravity concentration of metals and arsenic. The best results were obtained using a shaking table. The latter made it possible to increase the lead content in the concentrate by 22 times as compared to the content in the original sample, arsenic content by 7.7 times, and iron content by 16.7 times. Magnetic concentration of the shaking table middlings made it possible to obtain a concentrate with a high content and recovery of iron, copper and zinc. Despite the fact that the soil waste contains a significant amount of organic matter unlike the case of ore processing, the possibility of successful metal recover and significant reduction of metal concentrations in soil is shown. The proposals for a further waste-recycling scheme are made on the basis of the data obtained.

Keywords: reclamation, technogenic waste, ore concentration methods, technogenic deposit, object of accumulated harm, contamination, lead

For citation: Trusova V.V., Kachor O.L., Alekseev A.S., Parshin A.V. First results of using mineral concentration methods for metal recover from technogenically contaminated soils with significant organic concentrations. *Nauki o Zemle i nedropol'zovanie = Earth sciences and subsoil use*. 2023;46(4):432-444. (In Russ.). <https://doi.org/10.21285/2686-9993-2023-46-4-432-444>. EDN: PYLLUR.

Введение

В соответствии со ст. 1 Федерального закона от 10 января 2002 г. № 7-ФЗ «Об охране окружающей среды»¹, накопленный вред окружающей среде определяется как ущерб для окружающей среды, возникший в результате прошлой экономической и иной деятельности, обязанности по устранению которой не были выполнены либо были выполнены не в полном объеме. Объекты накопленного вреда окружающей среде занимают значительные площади земель, являются источниками поступления в окружающую среду загрязняющих веществ, что в конечном итоге приводит к загрязнению почв, поверхностных и подземных водных объектов, в том числе источников водоснабжения, и к нарушению

геохимического баланса территорий.

Выявление и оценку объектов накопленного вреда окружающей среде проводят государственные органы власти субъектов Российской Федерации, в некоторых случаях – федеральные органы исполнительной власти. Выявление объекта негативного воздействия на окружающую среду осуществляется посредством инвентаризации и обследования территорий и акваторий, на которых в прошлом осуществлялась экономическая и иная деятельность и (или) расположены хозяйственные объекты капитального строительства и объекты размещения отходов (п. 1 ст. 80.1 закона № 7-ФЗ). Обнаруженные объекты негативного воздействия на окружающую среду вносятся в Государственный реестр

¹ Об охране окружающей среды: федер. закон от 10 января 2002 г. № 7-ФЗ // КонсультантПлюс. Режим доступа: https://www.consultant.ru/document/cons_doc_LAW_34823/?ysclid=lqepmt6dvt305640878 (дата обращения: 24.11.2023).



объектов накопленного вреда окружающей среде после предоставления в региональные министерства информации по первоначальной оценке экологического состояния исследуемой техногенно-нарушенной территории. Эта информация включает в себя уровень и масштаб негативного воздействия на окружающую среду, способность загрязняющих веществ к миграции в другие компоненты природной среды, а также возможность загрязнения водных объектов и возникновения экологических рисков. По состоянию на октябрь 2023 г. в Государственный реестр объектов накопленного вреда окружающей среде входит 502 объекта, 4 из которых находятся на территории Иркутской области².

Еще одним потенциальным объектом для включения в перечень объектов негативного воздействия на окружающую среду является промышленная площадка бывшего завода по производству аккумуляторов ОАО «Востсибэлемент», расположенного в г. Свирске Иркутской области. Работы по масштабной оценке экологического состояния территории данного объекта проводятся в Иркутском национальном исследовательском техническом университете с 2021 г. – с тех пор, как в университет с этим запросом обратилась администрация г. Свирска [1–3].

Завод ОАО «Востсибэлемент» был основан в 1939 г. и просуществовал до 1999 г. С тех пор здания предприятия так и не были демонтированы, промплощадка не рекультивировалась. Бывший завод расположен в пределах жилой зоны по соседству с несколькими садоводствами в 5 м от р. Ангара. Сама промплощадка занимает площадь в 35 га: на ней расположены полуразрушенные цеха, построенные в разное время, отходы производства и загрязненный почвогрунт.

В разное время данным объектом и сопредельными территориями занимались значительное количество исследовательских коллективов из различных организаций [4–7], но, вероятно, в связи с высокой изменчивостью геохимических аномалий на участке, требующей повышенной детальности исследований, крайне высокая опасность объекта не была зафиксирована. Тем не менее по результатам исследований, проведенных в 2021–2022 гг. разными научными коллективами Иркутского

национального исследовательского технического университета, рассматриваемая территория является источником накопленного вреда окружающей среде. В ходе наших исследований было установлено, что в техногенном грунте промплощадки бывшего завода «Востсибэлемент» концентрации загрязняющих веществ превышают нормативные и фоновые значения по свинцу (предельно допустимая концентрация – 32 мг/кг) в отдельных пробах в несколько тысяч раз, цинку (ориентировочно допустимая концентрация – 55 мг/кг), меди (ориентировочно допустимая концентрация – 33 мг/кг), а также по мышьяку (предельно допустимая концентрация – 2 мг/кг) в сотни раз, что позволяет рассматривать такой почвогрунт как отход производства. По результатам биотестирования было установлено, что на отдельных участках промплощадки присутствует настолько загрязненный почвогрунт, что его можно отнести ко II и III классу опасности [1]. Также зафиксировано, что загрязняющие вещества проникли вглубь почвенного профиля и концентрируются в плотном суглинке с глубины от 1,5 м. Токсиканты с промплощадки наблюдаются в объектах окружающей среды и за пределами бывшего завода. Так, данные о состоянии донных отложений р. Ангара свидетельствуют о значительном накоплении в них загрязняющих веществ ниже по течению реки от промплощадки. Данные снегогеохимической съемки по г. Свирску наглядно представляют масштабные ореолы негативного влияния бывшего аккумуляторного завода на состояние атмосферного воздуха в населенном пункте [2]. Кроме того, в последние годы на неогороженной территории промплощадки все чаще проводятся незаконные работы по разбору зданий для выемки коммуникаций с целью их дальнейшей сдачи в качестве вторсырья. Такие действия приводят к дополнительному вторичному загрязнению за счет возвращения адсорбированных на глиняном затворе (ниже 1,5 м) токсикантов снова на дневную поверхность, а также из поверхностного слоя почвогрунта и строительных конструкций в воздушную среду.

В связи со всем вышесказанным разработка технологии для скорейшей рекультивации территории промплощадки бывшего аккумуляторного завода «Востсибэлемент» является актуальной задачей. Гипотеза проведенного

² Государственный реестр объектов накопленного вреда окружающей среде по состоянию на 24 октября 2023 г. Режим доступа: <https://www.mnr.gov.ru/upload/medialibrary/3c0/%D0%93%D0%A0%D0%9E%D0%9D%D0%92%D0%9E%D0%A1%20%D0%BD%D0%B0%2015.07.2022.XLSX?ysclid=lc4te08ujr351819878> (дата обращения: 24.11.2023).



исследования заключается в доказательстве или опровержении возможности успешного применения методов обогащения руд для объекта с достаточно высоким содержанием органического вещества, который представляет собой почвогрунт промплощадки.

Материалы и методы исследования

Осенью 2022 и 2023 гг. на некоторых участках промплощадки бывшего завода «Востсибэлемент» со значимыми (но не максимальными) концентрациями загрязняющих веществ были отобраны семь проб почвогрунта, которые по имеющимся данным должны были отражать возможные средние (не максимальные) концентрации загрязняющих веществ в почвогрунте объекта (рис. 1).



Рис. 1. Местоположение площадки и точки отбора проб:

1 – точки; 2 – граница

Fig. 1. Site location and sampling points:

1 – points; 2 – boundary

Эти участки представляют наибольший интерес для применения на них рекуперативных технологий, так как почвогрунт с высоким содержанием загрязняющих веществ является как основой экологической проблемы, так и наиболее показательным объектом для отработки способов извлечения ценных компонентов.

Отбор проб для определения концентрации металлов в почвогрунте проводился на площадке бывшего завода в соответствии с ГОСТ 17.4.3.01-2017³ методом точечной пробы послойно с глубин 0–5 и 5–20 см, вес каждой пробы составлял около 1 кг. Для изучения возможности извлечения металлов из почвогрунта в этих же точках были отобраны пробы массой около 10 кг каждая.

Количественный химический анализ исходных проб и продуктов обогащения проводился по ГОСТ 33850-2016⁴. Химический состав определяется методом рентгенофлуоресцентной спектроскопии с использованием портативного рентгенофлуоресцентного анализатора SciAps серии X200 в режиме «Почва». Возможность применения портативного анализатора для оперативной и точной оценки состояния почв была подтверждена в ранее выполненных исследованиях [8].

Минералогические исследования отобранных проб проводили с использованием сканирующего электронного микроскопа Tescan MIRA 3 LMN. Препараты для анализа изготавливали по общепринятым методикам в виде блоков из эпоксидной смолы (эпоксидных «шашек») с нанесенными на них минеральными зернами.

Гравитационное обогащение проводили на концентрационном столе СКОШ-0,5 и винтовом шлюзе (ШВ-250). Подготовка проб к технологическим исследованиям осуществлялась по классической методике, включающей последовательное дробление проб в замкнутом цикле с грохочением до крупности -0,315 мм при тщательном перемешивании.

Разделение проб на магнитную и немагнитную фракции проводили на электромагнитном сепараторе 120Т-СЭМ с силой тока 1 А.

³ ГОСТ 17.4.3.01-2017. Почвы. Общие требования к отбору проб // Консорциум «Кодекс». Режим доступа: <https://docs.cntd.ru/document/1200159508?ysclid=lqeqv1jzud43703754> (дата обращения: 24.11.2023).

⁴ ГОСТ 33850-2016. Почвы. Определение химического состава методом рентгенофлуоресцентной спектроскопии // Консорциум «Кодекс». Режим доступа: <https://docs.cntd.ru/document/1200140375> (дата обращения: 24.11.2023).



Результаты исследования и их обсуждение

В первую очередь для установления содержания наиболее значимых металлов, которые предполагается извлечь из почвогрунта промплощадки, был произведен количественный химический анализ отобранных проб. Результаты анализа представлены в табл. 1.

Как видно из табл. 1, во всех пробах отмечено существенное превышение существующих нормативов по всем или некоторым из приведенных элементов. Концентрации наиболее значимы в пробе 1, однако и в ней в сопоставлении с максимальными обнаруженными концентрациями [1] выявленные содержания относительно невысоки. Дополнительно следует отметить, что наряду с металлами, являющимися предметом данной работы, важнейшим поллютантом на промплощадке является мышьяк. По имеющимся данным он в основном находится в водорастворимой форме и является фактором, который не может быть проигнорирован при разработке схемы обогащения отходов.

Исследование проб на электронном микроскопе (рис. 2) показало, что свинец в пробах находится в основном в форме оксидов и карбонатов (платтнерит PbO_2 и церуссит $PbCO_3$). Железо присутствует в пробах в виде сульфидных (пирит) и окисленных соединений: магнетит, сидерит, гетит и другие оксиды. Также в пробах отмечается присутствие следующих минералов: каолин, доломит, биотит,

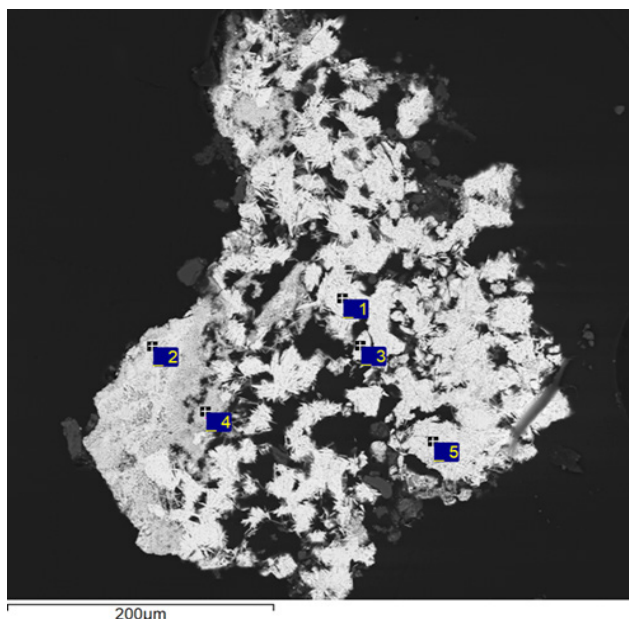


Рис. 2. Электронное изображение пробы 1, -1+0,5 мм:
1, 3, 5 – платтнерит, 2, 4 – церуссит

Fig. 2. Electronic image of the sample 1, -1+0.5 mm:
1, 3, 5 – plattnerite, 2, 4 – cerussite

кальцит, плагиоклаз, кварц, полевые шпаты, гранат, амфиболы, пироксены, хлориты, мусковит и другие.

В настоящее время для переработки свинецсодержащих отходов зачастую применяются пирометаллургические, гидрометаллургические и электрохимические методы⁵ [9]. Тем не менее сложный морфологический состав исследуемых отходов и примеси токсичных летучих элементов не позволяют экологично применять вышеупомянутые методы.

Таблица 1. Содержания преобладающих металлов по результатам количественного химического анализа семи проб почвогрунта промплощадки бывшего завода «Востсибэлемент»
Table 1. Contents of predominant metals according to the results of quantitative chemical analysis of seven soil samples at the former Vostsibelement plant industrial site

Шифр пробы	Концентрация, мг/кг			
	Pb	Fe	Zn	Cu
1 п	19250,37	37135,31	9794,44	258,32
2 п	2849,53	21899,36	223,49	213,62
3 п	914,29	13580,77	40,18	94,96
4 п	2045,43	7660,86	47,84	9,25
5 п	2042,59	14256,09	23,85	29,04
6 п	317,12	35617,31	179,49	49,37
7 п	7402,08	42470,97	597,62	115,2

⁵ Карелов С.В. Научно-технический отчет о выполнении 5 этапа Государственного контракта № 16.740.11.0522 от 16 мая 2011 г. и Дополнению от 15 марта 2013 г. № 1. Екатеринбург, 2013. 125 с. Режим доступа: https://elar.urfu.ru/bitstream/10995/21955/1/otchet_GK_16.740.11.0522_Karelov_S.V..pdf (дата обращения: 24.11.2023).



Так как преобладающими минеральными формами свинца в пробах являются минералы, относящиеся к тяжелым (плотность платнерита – 9,4–9,44 г/см³, церуссита – 6,53–6,57 г/см³), в работе использован гравитационный метод обогащения для извлечения свинца из проб, отобранных на промплощадке. Гравитационные методы обогащения занимают ведущее место (наряду с флотационными и магнитными) среди других методов обогащения, являются экономичными, экологически безопасными, имеют широкий диапазон крупности разделяемых минеральных частиц. Гравитационные методы обогащения используются при обогащении углей и сланцев, золото- и платиносодержащих руд, оловянных, окисленных железных и марганцевых руд, хромовых, вольфрамитовых руд и руд редких металлов, строительных материалов и некоторых других видов сырья [10–13]. Также гравитационные методы обогащения широко используются при переработке лежалых хвостов обогатительных фабрик и отходов производства [14–28].

Для обоснования выбора гравитационного аппарата для извлечения металлов были проведены предварительные тестовые исследования с использованием винтового шлюза и концентрационного стола. В табл. 2 приведены результаты, полученные для пробы 4, характеризующейся невысокими содержаниями элементов относительно большинства проб почвогрунта при полном обследовании промплощадки.

Для проведения экспериментов исходная проба была разделена на части и каждая из этих частей была подвергнута дополнительному химическому анализу, в связи с чем концентрации металлов в табл. 1 и 2 незначительно различаются. Так как концентрации некоторых представленных в табл. 2 металлов как в исходной пробе, так и в продуктах обогащения достаточно низкие, то для удобства восприятия они приведены в нестандартной для обогатительных расчетов размерности – мг/кг.

Как видно из табл. 2, результаты тестовых исследований показали, что несмотря на то, что выход концентрата винтового шлюза в несколько раз превышает выход концентрата концентрационного стола, винтовой шлюз не позволяет разделить металлы по продуктам обогащения. Дополнительные эксперименты по обогащению на центробежном концентраторе Knelson KC-MD3 не дали положительного результата и были признаны неэффективными. Поэтому в дальнейшем для извлечения металлов (в первую очередь свинца как одного из приоритетных загрязнителей промплощадки бывшего завода «Востсибэлемент») был использован концентрационный стол.

На концентрационный стол подавалась объединенная проба, полученная смешиванием проб с разных участков в равных пропорциях общей массой 13 кг, для усреднения проб высокозагрязненных площадей промплощадки с целью имитации рабочего технологического процесса. Результаты опыта (рис. 3) приведены в табл. 3.

Таблица 2. Результаты обогащения проб на концентрационном столе и винтовом сепараторе
Table 2. Results of sample concentration on a shaking table and in a spiral concentrator

Продукт обогащения	Выход, %	Pb		Cu		Fe		Zn	
		β, мг/кг	ε, %	β, мг/кг	ε, %	β, мг/кг	ε, %	β, мг/кг	ε, %
Винтовой шлюз									
Концентрат	9,1	2820,6	12,3	–	–	7690,5	10	39,1	10,3
Хвосты	90,9	2016,9	87,7	14,3	100	6920,1	90	33,9	89,7
Исходная проба	100	2089,9	100	13	100	6990,1	100	34,4	100
Концентрационный стол									
Концентрат	0,1	100314,2	3,9	91,4	0,4	117544,8	1,6	171	0,3
Промпродукт	0,4	40563,9	6,6	40,2	0,9	67796,9	4,5	115,4	0,9
Хвосты	99,5	2212,7	89,5	18,1	98,6	5921,6	93,8	51	98,8
Исходная проба	100	2459,9	100	18,2	100	6279,3	100	51,4	100

Примечание. β – содержание элемента в продукте; ε – извлечение элемента в продукт.



Рис. 3. Процесс обогащения на концентрационном столе
Fig. 3. Mineral concentration on the shaking table

Таблица 3. Результаты обогащения объединенной пробы на концентрационном столе СКОШ-0,5
Table 3. Results of combined sample concentration on the SKOSH-0.5 shaking table

Наименование продукта	Выход, %	Pb		Fe		Zn		As	
		β , %	ϵ , %	β , %	ϵ , %	β , %	ϵ , %	β , мг/кг	ϵ , %
Концентрат	1,2	6,6	27,9	40,1	20	0,2	0,8	1153	9,3
Промпродукт	5,8	0,3	7,1	4,5	10,8	0,1	2,4	3	0,1
Хвосты	93	0,2	65	1,8	69,2	0,3	96,7	146	90,6
Исходная руда	100	0,3	100	2,4	100	0,3	100	149,9	100

Примечание. β – содержание элемента в продукте; ϵ – извлечение элемента в продукт.

По полученным результатам видно, что обогащение на концентрационном столе позволило увеличить содержание свинца в концентрате в 22 раза по сравнению с содержанием в исходной пробе, мышьяка – в 7,7 раза, железа – в 16,7 раза; разделения цинка по продуктам обогащения не происходит.

Для извлечения соединений железа, которые в основном относятся к парамагнетикам (сидерит, гетит, пирит) и ферромагнетикам (магнетит), использовался магнитный метод обогащения. Промпродукт концентрационного стола одного из опытов направлялся на сухую магнитную сепарацию, результаты приведены в табл. 4.

Таблица 4. Результаты обогащения проб на магнитном сепараторе 120Т-СЭМ
Table 4. Results of sample concentration using a 120T-SEM magnetic separator

Наименование продукта	Выход, %	Pb		Fe		Cu		Zn	
		β , %	ϵ , %	β , %	ϵ , %	β , %	ϵ , %	β , %	ϵ , %
Концентрат	18	0,2	25,1	61,5	97,6	0,013	73	0,03	68,3
Хвосты	82	0,13	74,9	0,34	2,4	0,001	27	0,003	31,6
Исходная проба	100	0,15	100	11,4	100	0,003	100	0,008	100

Примечание. β – содержание элемента в продукте; ϵ – извлечение элемента в продукт.



Магнитное обогащение позволило получить концентрат с высоким содержанием и извлечением железа, меди и цинка. На данном этапе достигнуто снижение концентрации относительно исходного содержания железа более чем в 30 раз, меди – в 3 раза, цинка – в 2,5 раза.

Следует отметить, что примененные на данном этапе методы не позволили существенно снизить концентрацию свинца. Над методикой извлечения свинца предполагается работать на следующем этапе исследования, поскольку методы пирометаллургии, являющиеся наиболее эффективными для обогащения свинцовых руд, на данном этапе применить не представлялось возможным в связи с очевидными экологическими последствиями от наличия в пробах высоких содержаний мышьяка. В настоящее время разрабатывается способ его извлечения, после чего работы по созданию оптимальной схемы переработки загрязненных почвогрунтов будут продолжены.

Заключение

На данный момент опыты по обогащению загрязненного почвогрунта с заметным содержанием органического вещества позволили добиться извлечения ряда металлов. Совокуп-

ность гравитационного и магнитного методов обогащения показала хорошие результаты для извлечения железа, меди и цинка, вплоть до того, что полученный концентрат можно рассматривать как источник для получения товарных продуктов перечисленных металлов. На данный момент окончательно не решена задача извлечения свинца, связанная с наличием в пробах мышьяка, затрудняющего применение методов пирометаллургии. В настоящее время завершаются эксперименты по наиболее рациональному и экологичному извлечению мышьяка, находящегося преимущественно в водорастворимой форме, что представляет собой задачу, но не научную проблему. После этого исследование по обогащению всех присутствующих в значимых концентрациях металлов станет возможным завершить.

Важно отметить, что даже полученные на данный момент предварительные результаты по достижению уровня товарного продукта для ряда металлов с принципиальным снижением их концентраций в хвостах свидетельствуют в пользу перспектив рекуперативного подхода к ликвидации объектов с полиметаллическим загрязнением, основанного на применении методов обогащения для почвогрунтов со значимым содержанием органического вещества.

Список источников

1. Качор О.Л., Паршин А.В., Трусова В.В. Комплексный подход к геоэкологической оценке объектов накопленного вреда // Теоретическая и прикладная экология. 2022. № 4. С. 65–71. <https://doi.org/10.25750/1995-4301-2022-4-065-071>. EDN: ADEBVY.
2. Качор О.Л., Паршин А.В., Трусова В.В., Курина А.В. Установление масштабов негативного влияния промплощадки бывшего завода «Востсибэлемент» на объекты окружающей среды // Технологии переработки отходов с получением новой продукции: материалы IV Всерос. науч.-практ. конф. (г. Киров, 30 ноября 2022 г.). Киров, 2022. С. 247–250. EDN: ODGNBY.
3. Богданов А.В., Шкрабо А.И., Шатрова А.С. Технологические решения рекультивации промплощадки бывшего аккумуляторного завода «Востсибэлемент» // Науки о Земле и недропользование. 2023. Т. 46. № 1. С. 84–96. <https://doi.org/10.21285/2686-9993-2023-46-1-84-96>. EDN: DZMCEJ.
4. Баенгуев Б.А., Белоголова Г.А., Чупарина Е.В., Просекин С.Н., Долгих П.Г., Пастухов М.В. Распределение содержания свинца и формы его соединений в техногенной почве г. Свирска (Южное Прибайкалье) // Известия Томского политехнического университета. Инжиниринг георесурсов. 2022. Т. 333. № 8. С. 205–214. <https://doi.org/10.18799/24131830/2022/8/3670>. EDN: KDNQGI.
5. Хуснидинов Ш.К., Сосницкая Т.Н., Бутырин М.В., Замашиков Р.В. Оценка загрязнения почвенного покрова тяжелыми металлами и мышьяком МО г. Свирск Иркутской области // Вестник Бурятской государственной сельскохозяйственной академии им. В.Р. Филиппова. 2014. № 1. С. 45–50. EDN: RYMKFL.
6. Бутырин М.В., Хуснидинов Ш.К., Сосницкая Т.Н., Замашиков Р.В. Оценка опасности загрязнения окружающей природной среды тяжелыми металлами в условиях Иркутской области // Плодородие. 2017. № 6. С. 45–48. EDN: YMJWOM.
7. Белоголова Г.А., Гордеева О.Н., Коваль П.В., Джао К.Х., Гао Г.Л. Закономерности распределения и формы нахождения тяжелых металлов в техногенно-трансформированных черноземах южного Приангарья и Северо-Восточного Китая // Почвоведение. 2009. № 4. С. 429–440. EDN: JXOUNF.
8. Бакалова Д.П., Чижков Ю.С., Трусова В.В. Использование экспресс-методов анализа в геоэкологическом мониторинге // Перспективы развития горно-металлургической отрасли (Игошинские чтения): материалы Всерос. науч.-практ. конф. (г. Иркутск, 26 ноября 2021 г.). Иркутск, 2022. С. 62–66. EDN: RZZKGE.



9. Matinde E., Simate, G.S., Ndlovu S. Mining and metallurgical wastes: a review of recycling and re-use practices // Journal of the Southern African Institute of Mining and Metallurgy. 2018. Vol. 118. Iss. 5. P. 825. <https://doi.org/10.17159/2411-9717/2018/v118n8a5>.

10. Мязин В.П., Литвинцев С.А. Повышение эффективности гравитационного извлечения золота из комплексных золотополиметаллических руд // Известия Сибирского отделения секции наук о Земле Российской академии естественных наук. Геология, разведка и разработка месторождений полезных ископаемых. 2018. Т. 41. № 1. С. 126–136. <https://doi.org/10.21285/2541-9455-2018-41-1-126-136>. EDN: YXCMFW.

11. Александрова Т.Н., Таловина И.В. Платиновые металлы аподунитовых кор выветривания и оценка возможности их эффективного обогащения в гравитационных аппаратах // Физико-технические проблемы разработки полезных ископаемых. 2017. № 3. С. 141–147. EDN: ZAGVED.

12. Алгебраистова Н.К., Бурдакова Е.А., Маркова А.С., Макшанин А.В. Обогащение благороднометалльного сырья на центробежных аппаратах // Цветные металлы. 2017. № 1. С. 18–22. <https://doi.org/10.17580/tsm.2017.01.03>. EDN: YGJQCR.

13. Кусков В.Б., Кускова Я.В. Гравитационное обогащение флюоритовых руд Амдерминского месторождения // Обогащение руд. 2017. № 6. С. 20–25. <https://doi.org/10.17580/or.2017.06.04>. EDN: ZWMLPT.

14. Соколов В.А., Киров С.С., Богатырева Е.В., Гаспарян М.Д. Получение диоксида циркония из цирконового концентрата по экологически безопасным технологиям // Цветные металлы. 2023. № 3. С. 46–53. <https://doi.org/10.17580/tsm.2023.03.07>. EDN: JLIHR.

15. Пелевин А.Е., Шигаева В.Н. Возможность получения ильменитового концентрата из отходов обогащения титаномагнетитовой руды // Обогащение руд. 2022. № 2. С. 46–52. <https://doi.org/10.17580/or.2022.02.08>. EDN: DCNLJQ.

16. Худояров С.Р., Якубов М.М., Пирматов Р.Х., Валиев Х.Р. Техногенные ресурсы черной металлургии и их комплексная переработка в условиях АО «Узметкомбинат» // Черные металлы. 2022. № 2. С. 67–71. <https://doi.org/10.17580/chm.2022.02.12>.

17. Кожонов А.К., Молдобаев Э.С., Алмакучукова Г.М., Орозова Г.Т. Технологический подход к переработке лежалых хвостов золотоизвлекательных фабрик // Известия Кыргызского государственного технического университета им. И. Раззакова. 2022. № 4. С. 402–413. <https://doi.org/10.56634/16948335.2022.4.402-401>. EDN: HLHTWM.

18. Лаврик А.В., Рассказова А.В. Исследование возможности применения технологии гравитационного обогащения золотосодержащих кварцевых руд при освоении месторождения «Делькен» // Кулагинские чтения: техника и технологии производственных процессов: материалы XX Междунар. науч.-практ. конф. (Чита, 30 ноября – 4 декабря 2020 г.). Чита, 2020. С. 32–35. EDN: ZLCBOF.

19. Хохуля М.С., Фомин А.В., Алексеева С.А., Карпов И.В. Ресурсосберегающая технология получения гематитового концентрата из складированных хвостов обогатительного производства АО «Олкон» // Горный журнал. 2020. № 9. С. 85–90. <https://doi.org/10.17580/gzh.2020.09.12>. EDN: ZELWMK.

20. Пузик А.Ю. Перспективы использования хвостов обогащения хромитовых руд Сарановского месторождения как источника хрома и платинидов // Горное эхо. 2019. № 4. С. 3–9. <https://doi.org/10.7242/echo.2019.4.1>. EDN: YZBWYX.

21. Сапинов Р.В., Куленова Н.А., Суюндикиев М.М., Олейникова Н.В. Перспективы получения олова из техногенного сырья в Казахстане // Вестник Восточно-Казахстанского государственного технического университета им. Д. Серикбаева. 2019. № 3. С. 155–160. EDN: RHXEVA.

22. Богомяков Р.В., Литвинова Н.М., Рассказова А.В., Лаврик Н.А. Использование гравитационных процессов при переработке золошлаковых материалов // Маркшейдерия и недропользование. 2019. № 5. С. 50–52.

23. Терещенко С.В., Алексеева С.А., Рухленко Е.Д., Кремнецкая И.П., Мосендз И.А. О возможности переработки техногенных отходов добычи флогопитового сырья // Горный информационно-аналитический бюллетень (научно-технический журнал). 2017. № 10. С. 186–193. <https://doi.org/10.25018/0236-1493-2017-10-0-186-193>. EDN: ZQJLNZ.

24. Прохоров К.В., Богомяков Р.В., Лаврик Н.А., Литвинова Н.М. К вопросу извлечения золота из магнитного концентрата золошлакового материала // Горный информационно-аналитический бюллетень (научно-технический журнал). 2016. № 21. С. 272–281. EDN: WRKMDF.

25. Tastanov Y., Serzhanova N., Ultarakova A., Sadykov N., Yerzhanova Z., Tastanova A. Recycling of chrome-containing waste from a mining and processing plant to produce industrial products // Processes. 2023. Vol. 11. Iss. 6. P. 1659. <https://doi.org/10.3390/pr11061659>.

26. Han Z., Golev A., Edraki M. A review of tungsten resources and potential extraction from mine waste // Minerals. 2021. Vol. 11. Iss. 7. P. 701. <https://doi.org/10.3390/min11070701>.

27. Whitworth A., Forbes E., Verster I., Jokovic V., Awatey B., Parbhakar-Fox A. Review on advances in mineral processing technologies suitable for critical metal recovery from mining and processing wastes // Cleaner Engineering and Technology. 2022. Iss. 7. P. 100451. <https://doi.org/10.1016/j.clet.2022.100451>.

28. Зашихин А.В. Гравитационные сепараторы новой конструкции // Металлургия цветных, редких и благородных металлов: сб. докл. XVI Междунар. конф. (г. Красноярск, 5–8 сентября 2023 г.). Красноярск, 2023. С. 394–399. <https://doi.org/10.47813/sfu.mnfrpm.2023.394-399>. EDN: SVLMOV.



References

1. Kachor O.L., Parshin A.V., Trusova V.V. An integrated approach to the geoecological assessment of accumulated damage objects. *Teoreticheskaya i prikladnaya ekologiya = Theoretical and Applied Ecology*. 2022;4:65-71. (In Russ.). <https://doi.org/10.25750/1995-4301-2022-4-065-071>. EDN: ADEBVY.
2. Kachor O.L., Parshin A.V., Trusova V.V., Kurina A.V. Determination of adverse impact of the former Vostsibelement plant industrial site on environmental objects. In: *Tekhnologii pererabotki otkhodov s polucheniem novoi produktsii: materialy IV Vseros. nauch.-prakt. konf = Waste recycling technologies to obtain new products: materials of the 4th All-Russian scientific and practical conference*. 30 November 2012, Kirov. Kirov; 2022, p. 247-250 (In Russ.). EDN: ODGNBY.
3. Bogdanov A.V., Shkrabo A.I., Shatrova A.S. Process engineering solutions for reclamation of former Vostsibelement battery plant industrial site. *Nauki o Zemle i nedropol'zovanie = Earth Sciences and Subsoil Use*. 2023;46(1):84-96. (In Russ.). <https://doi.org/10.21285/2686-9993-2023-46-1-84-96>. EDN: DZMCEJ.
4. Baenguev B.A., Belogolova G.A., Chuparina E.V., Prosekin S.N., Dolgikh P.G., Pastukhov M.V. Lead distribution and forms of lead-containing compounds in the technogenic soil, Svirsk town, South Baikal region. *Izvestiya Tomskogo politekhnicheskogo universiteta. Inzhiniring georesursov = Bulletin of the Tomsk Polytechnic University. Geo Assets Engineering*. 2022;333(8):205-214. (In Russ.). <https://doi.org/10.18799/24131830/2022/8/3670>. EDN: KDNQGI.
5. Khusnidinov Sh.K., Sosnitskaya T.N., Butyrin M.V., Zamashchikov R.V. The evaluation of soil pollution by heavy metals and arsenic in the town of Svirsk of Irkutsk region. *Vestnik Buryatskoi gosudarstvennoi sel'skokhozyaistvennoi akademii im. V.R. Filippova = Vestnik of Buryat State Academy of Agriculture named after V. Philippov*. 2014;1:45-50. (In Russ.). EDN: RYMKFL.
6. Butyrin M.V., Khusnidinov Sh.K., Sosnitskaia T.N., Zamaschikov R.V. Risk assessment of environmental pollution with heavy metals in the Irkutsk oblast. *Plodorodie*. 2017;6:45-48. (In Russ.). EDN: YMJWOM
7. Belogolova G.A., Gordeeva O.N., Koval P.V., Zhou Q.X., Guo G.L. Regularities of the distribution and heavy metal forms in technogenically transformed chernozems of the southern Angara river basin and Northeastern China. *Pochvovedenie = Soil Science*. 2009;4:429-440. (In Russ.). EDN: JXOUNF.
8. Bakalova D.P., Chizhkov Yu.S., Trusova V.V. Using rapid analysis methods in geoecological monitoring. In: *Perspektivy razvitiya gorno-metallurgicheskoi otrasli (Igoshinskie chteniya): materialy Vseros. nauch.-prakt. konf. = Mining and Metallurgical Industry Development Prospects (Igoshin Readings): materials of the All-Russian scientific and practical conference*. 26 November 2022, Irkutsk. Irkutsk; 2022, p. 62-66. (In Russ.). EDN: RZZKGE.
9. Matinde E., Simate, G.S., Ndlovu S. Mining and metallurgical wastes: a review of recycling and re-use practices. *Journal of the Southern African Institute of Mining and Metallurgy*. 2018;118(5):825. <https://doi.org/10.17159/2411-9717/2018/v118n8a5>.
10. Myazin V.P., Litvintsev S.A. Improving efficiency of gold recovery from complex gold-polymetallic ores by gravity separation. *Izvestiya Sibirskogo otdeleniya seksii nauk o Zemle Rossiiskoi akademii estestvennykh nauk: Geologiya, razvedka i razrabotka mestorozhdenii poleznykh iskopaemykh = 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*. 2018;41(1):126-136. (In Russ.). <https://doi.org/10.21285/2541-9455-2018-41-1-126-136>. EDN: YXCMFW.
11. Aleksandrova T.N., Talovina I.V. Platinum-group metals in residual soils and potential efficiency of their processing in gravity concentrators. *Fiziko-tekhnicheskie problemy razrabotki poleznykh iskopaemykh*. 2017;3:141-147. (In Russ.). EDN: ZAGVED.
12. Algebraistova N.K., Burdakova E.A., Markova A.S., Makshanin A.V. Ore dressing of precious metal bearing rocks in centrifugal machines. *Tsvetnye metally*. 2017;1:18-22. (In Russ.). <https://doi.org/10.17580/tsm.2017.01.03>. EDN: YGJQCR.
13. Kuskov V.B., Kuskova Ya.V. The Amderminskoye deposit fluorite ores gravity concentration. *Obogashchenie rud*. 2017;6:20-25. (In Russ.). <https://doi.org/10.17580/or.2017.06.04>. EDN: ZWMLPT.
14. Sokolov V.A., Kirov S.S., Bogatyreva E.V., Gasparyan M.D. Production of zirconium dioxide from zircon concentrate using environmentally friendly technology. *Tsvetnye metally*. 2023;3:46-53. (In Russ.). <https://doi.org/10.17580/tsm.2023.03.07>. EDN: JLIEHR.
15. Pelevin A.E., Shigaeva V.N. Possibility of obtaining ilmenite concentrate from titanomagnetite ore enrichment waste. *Obogashchenie rud*. 2022;2:46-52. (In Russ.). <https://doi.org/10.17580/or.2022.02.08>. EDN: DCNLJQ.
16. Khudoyarov S.R., Yakubov M.M., Pirmatov R.Kh., Valiev Kh.R. Technogenic resources of ferrous metallurgy and their complex processing in the conditions of JSC "Uzmetkombinat". *Chernye metally*. 2022;2:67-71. (In Russ.). <https://doi.org/10.17580/chm.2022.02.12>.
17. Kozhonov A.K., Moldobaev E.S., Almakychykova G.M., Orozova G.T. Technological solutions for processing tails of gold recovery factories. *Izvestiya Kyrgyzskogo gosudarstvennogo tekhnicheskogo universiteta im. I. Razzakova = Proceedings of the Kyrgyz State Technical University named after I. Razzakov*. 2022;4:402-413. (In Russ.). <https://doi.org/10.56634/16948335.2022.4.402-401>. EDN: HLHTWM.



18. Lavrik A.V., Rasskazova A.V. Studying the possibility to use gravity concentration technology for gold-bearing quartz ores under Delken deposit development. In: *Kulaginskiye chteniya: tekhnika i tekhnologii proizvodstvennykh protsessov: materialy XX Mezhdunar. nauch.-prakt. konf. = Kulagin Readings: equipment and technologies of production processes: materials of the 20th International scientific and practical conference*. 30 November – 4 December 2020, Chita. Chita; 2020, p. 32-35. (In Russ.). EDN: ZLCBOF.
19. Khokhulya M.S., Fomin A.V., Alekseeva S.A., Karpov I.V. Resource-saving technology for hematite concentration from storage mill tailings at Olkon mining and processing works. *Gornyi zhurnal*. 2020;9:85-90. (In Russ.). <https://doi.org/10.17580/gzh.2020.09.12>. EDN: ZELWMK.
20. Puzik A.Yu. Application prospects of Saranovskoye deposit chromite ore enrichment tailings as chromium and platinide compound source. *Gornoe ehkho*. 2019;4:3-9. (In Russ.). <https://doi.org/10.7242/echo.2019.4.1>. EDN: YZBWYX.
21. Sapinov R.V., Kulenova N.A., Suyundikov M.M., Oleinikova N.V. Prospects for tin production from technogenic raw materials in Kazakhstan. *Vestnik Vostochno-Kazakhstanskogo gosudarstvennogo tekhnicheskogo universiteta im. D. Serikbaeva = Bulletin of D. Serikbayev East Kazakhstan technical university*. 2019;3:155-160. (In Russ.). EDN: RHXEVA.
22. Bogomyakov R.V., Litvinova N.M., Rasskazova A.V., Lavrik N.A. Application of gravity processing for coal ash. *Marksheideriya i nedropol'zovanie*. 2019;5:50-52. (In Russ.).
23. Tereshchenko S.V., Alekseeva S.A., Rukhlenko E.D., Kremenetskaya I.P., Mosendz I.A. Phlogopite mining waste processibility. *Gornyi informatsionno-analiticheskii byulleten' (nauchno-tekhnicheskii zhurnal) = Mining Informational and Analytical Bulletin (Scientific and Technical Journal)*. 2017;10:186-193. (In Russ.). <https://doi.org/10.25018/0236-1493-2017-10-0-186-193>. EDN: ZQJLNZ.
24. Prohorov K.V., Bogomyakov R.V., Lavrik N.A., Litvinova N.M. Additional recovery of gold from magnetic concentrate of ash. *Gornyi informatsionno-analiticheskii byulleten' (nauchno-tekhnicheskii zhurnal) = Mining Informational and Analytical Bulletin (Scientific and Technical Journal)*. 2016;21:272-281. (In Russ.). EDN: WRKMDF.
25. Tastanov Y., Serzhanova N., Ultarakova A., Sadykov N., Yerzhanova Z., Tastanova A. Recycling of chrome-containing waste from a mining and processing plant to produce industrial products. *Processes*. 2023;11(6):1659. <https://doi.org/10.3390/pr11061659>.
26. Han Z., Golev A., Edraki M. A review of tungsten resources and potential extraction from mine waste. *Minerals*. 2021;11(7):701. <https://doi.org/10.3390/min11070701>.
27. Whitworth A., Forbes E., Verster I., Jokovic V., Awatey B., Parbhakar-Fox A. Review on advances in mineral processing technologies suitable for critical metal recovery from mining and processing wastes. *Cleaner Engineering and Technology*. 2022;7:100451. <https://doi.org/10.1016/j.clet.2022.100451>.
28. Zashikhin A.V. New gravity separators. In: *Metallurgiya tsvetnykh, redkikh i blagorodnykh metallov: sb. dokl. XVI Mezhdunar. konf. = Metallurgy of non-ferrous, rare and precious metals: collected reports of the 16th International conference*. 5–8 September 2023, Krasnoyarsk. Krasnoyarsk; 2023, p. 394-399. (In Russ.). <https://doi.org/10.47813/sfu.mnfrpm.2023.394-399>. EDN: SVLMOV.

Информация об авторах / Information about the authors



Трусова Валентина Валерьевна,

кандидат технических наук,
старший научный сотрудник департамента геоэкологии,
институт «Сибирская школа геонаук»,
Иркутский национальный исследовательский технический университет,
г. Иркутск, Россия,
старший научный сотрудник лаборатории геохимии рудообразования
и геохимических методов поисков,
Институт геохимии им. А.П. Виноградова СО РАН,
г. Иркутск, Россия,
✉ vvtrusova@geo.istu.edu

<https://orcid.org/0000-0002-8168-9537>

Valentina V. Trusova,

Cand. Sci. (Eng.),
Senior Researcher of the Geoecology Department,
Siberian School of Geosciences,
Irkutsk National Research Technical University,
Irkutsk, Russia,
Senior Researcher of the Laboratory of Geochemistry of Ore Formation
and Geochemical Prospecting Methods,
A.P. Vinogradov Institute of Geochemistry SB RAS,
Irkutsk, Russia,
✉ vvtrusova@geo.istu.edu

<https://orcid.org/0000-0002-8168-9537>

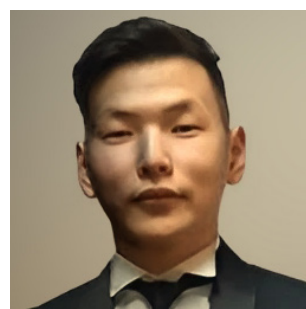


Качор Ольга Леонидовна,

доктор технических наук,
руководитель департамента геоэкологии,
институт «Сибирская школа геонаук»,
Иркутский национальный исследовательский технический университет,
г. Иркутск, Россия,
olgakachor@geo.istu.edu
<https://orcid.org/0000-0003-1889-9934>

Olga L. Kachor,

Dr. Sci. (Eng.),
Head of Geoecology Department,
Siberian School of Geosciences,
Irkutsk National Research Technical University,
Irkutsk, Russia,
olgakachor@geo.istu.edu
<https://orcid.org/0000-0003-1889-9934>

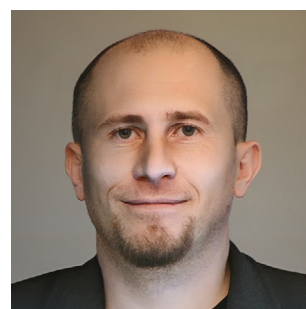


Алексеев Айаал Семенович,

аспирант,
Институт геохимии им. А.П. Виноградова СО РАН,
г. Иркутск, Россия,
младший научный сотрудник,
Иркутский научно-исследовательский институт
благородных и редких металлов и алмазов,
г. Иркутск, Россия,
jr.alexeev@gmail.com
<https://orcid.org/0009-0005-8014-9570>

Ayaal S. Alekseev,

Postgraduate Student,
A.P. Vinogradov Institute of Geochemistry SB RAS,
Irkutsk, Russia,
Junior Researcher,
Irkutsk Research Institute of Precious and Rare Metals and Diamonds,
Irkutsk, Russia,
jr.alexeev@gmail.com
<https://orcid.org/0009-0005-8014-9570>



Паршин Александр Вадимович,

кандидат геолого-минералогических наук,
научный руководитель института «Сибирская школа геонаук»,
Иркутский национальный исследовательский технический университет,
г. Иркутск, Россия,
научный сотрудник лаборатории геохимии рудообразования
и геохимических методов поисков,
Институт геохимии им. А.П. Виноградова СО РАН,
г. Иркутск, Россия,
sarhin@geo.istu.edu
<https://orcid.org/0000-0003-3733-2140>

Alexander V. Parshin,

Cand. Sci. (Geol. & Mineral.),
Scientific Director of the Siberian School of Geosciences,
Irkutsk National Research Technical University,
Irkutsk, Russia,
Researcher of the Laboratory of Geochemistry of Ore Formation
and Geochemical Prospecting Methods,
A.P. Vinogradov Institute of Geochemistry SB RAS,
Irkutsk, Russia,
sarhin@geo.istu.edu
<https://orcid.org/0000-0003-3733-2140>

Вклад авторов / Contribution of the authors

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

**Конфликт интересов / Conflict of interests**

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

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

Информация о статье / Information about the article

Статья поступила в редакцию 14.09.2023; одобрена после рецензирования 13.10.2023; принята к публикации 01.12.2023.

The article was submitted 14.09.2023; approved after reviewing 13.10.2023; accepted for publication 01.12.2023.



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 области. 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.

Всенадписинарисункахдолжныбытьредактируемыиисполнеными8кеглемшрифтаArial(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 (полуужирный 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 подрисовочные 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. И-026.



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-серицитовых формаций. 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 № 4 (85) 2023

Дизайнер А.А. Хохряков
Редактор Е.В. Шешуков
Перевод на английский язык В.В. Батицкой
Компьютерная верстка В.Г. Дмитриева

Издание распространяется бесплатно

Выход в свет 28.12.2023 г. Формат 60×90/8.
Бумага офсетная. Печать цифровая. Усл. печ. л. 14,5.
Тираж 500 экз. Зак. 146. 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