



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

НАУКИ О ЗЕМЛЕ И НЕДРОПОЛЬЗОВАНИЕ

Tom 47 **№ 1** 2024
Vol.

EARTH SCIENCES AND SUBSOIL USE

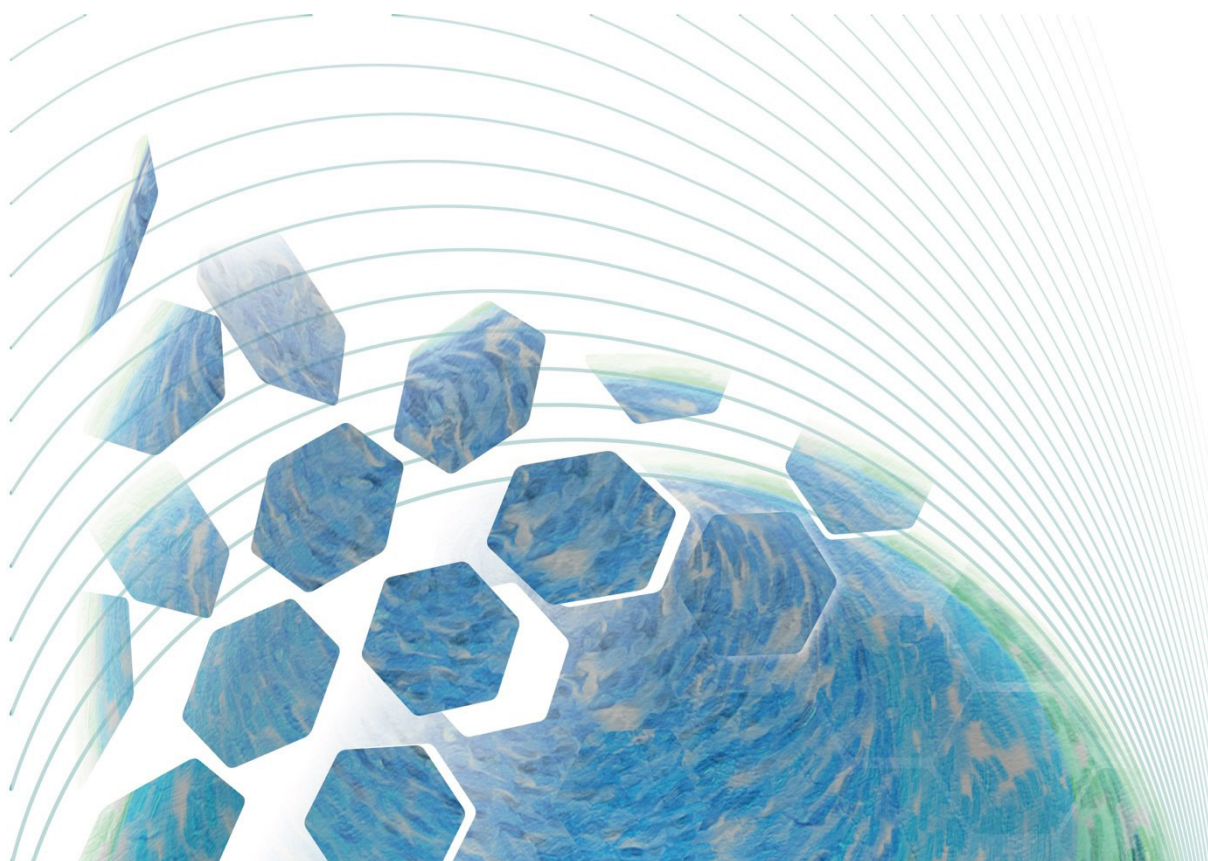
ISSN 2686-9993 (print)
ISSN 2686-7931 (online)

НАУКИ О ЗЕМЛЕ И НЕДРОПОЛЬЗОВАНИЕ

Том 47 № 1 2024
Vol.

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)

Гладкозуб 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 базу данных GeoRef, 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, ВИННИТИ РАН. Журнал включен в научную электронную библиотеку CyberLeninka, в базы данных открытого доступа DOAJ, OAJI, в международный каталог периодических изданий Ulrich's Periodicals Directory, в базу данных EBSCO. Журнал распространяется по подписке в ООО «Урал-Пресс», подписной индекс в ООО «Урал-Пресс» – 41538 (адрес ООО «Урал-Пресс»: 620026, Свердловская область, г. Екатеринбург, ул. Мамина-Сибиряка, 130, Россия). Статьи, опубликованные в журнале, реферируются и рецензируются. В журнал принимаются статьи по научному направлению «Науки о Земле».

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

Периодичность выхода – 4 раза в год

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

Регистрационный номер:
ПИ № ФС77-76110 от 24 июня 2019 г.

Учредитель и издатель:

Федеральное государственное бюджетное
образовательное учреждение высшего образования
«Иркутский национальный исследовательский
технический университет» (ФГБОУ ВО «ИРНИТУ»)
Россия, 664074, г. Иркутск, ул. Лермонтова, 83

Издательство:

Федеральное государственное бюджетное
образовательное учреждение высшего образования
«Иркутский национальный исследовательский
технический университет»
Россия, 664074, г. Иркутск, ул. Лермонтова, 83А

Адрес редакции:

Россия, 664074, г. Иркутск, ул. Лермонтова, 83
e-mail: nzn@istu.edu

© ФГБОУ ВО «Иркутский национальный
исследовательский технический
университет», 2024

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

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

Publication frequency

A quarterly journal

The journal is registered by the Federal Service for Supervision of Communications, Information Technology, and Mass Media (Roskomnadzor)
Registration No.:
ПИ no. ФС77-76110 of June 24, 2019

Founder and Publisher

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

Publishing House

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

Editorial Office

83 Lermontov St., Irkutsk 664074, Russia
e-mail: nzn@istu.edu

© Federal State Budget Educational Institution of Higher Education
"Irkutsk National Research Technical University", 2024



СОДЕРЖАНИЕ

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

Геофизика

Дмитриев А.Г., Дмитриева М.А., Ковалев А.С. Проблемы динамического диапазона и информативности изображения при визуализации сейсмических данных	6
---	---

Геология, поиски и разведка твердых полезных ископаемых, минерагения

Ковалев А.А., Карпов В.А., Макаров В.А., Падалко Н.Л. Применение изотопно-геохимических критериев при диагностике генезиса газовых систем Олимпиадинского золоторудного месторождения.....	17
--	----

Скузоватов С.Ю., Тарасова Ю.И. Сульфидная минерализация в орогенных эклогитах Северо-Муйского блока (северо-восточное Забайкалье): генезис и первые данные об изотопном составе серы.....	35
---	----

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

Гилязетдинов Р.А., Кулешова Л.С., Мухаметшин В.В., Гиззатуллина А.А. Глубокая дифференциация залежей нефти Урало-Поволжья с использованием факторного анализа	44
---	----

Данильев С.М., Шнюкова О.М. Перспективы развития технологии регистрации естественного электромагнитного излучения для прогноза геодинамических явлений в условиях рудников Норильска.....	56
---	----

Качор О.Л., Трусова В.В., Гантимурова С.А., Горячев И.Н., Икрамов З.Л., Паршин А.В. Территория бывшей промплощадки Ангарского металлургического завода (г. Свирск) 10 лет спустя: современное геохимическое состояние и анализ межгодовых изменений по данным дистанционного зондирования Земли.....	66
--	----

Погребная Д.А., Вахромеев А.Г. Особенности концентрирования редких металлов на месторождении кальдерного типа в миоцен-четвертичной бор-литиеносной провинции Северной Америки, поиск аналогов.....	90
---	----

Хороших М.С., Константинов К.М., Шарыгин И.С., Кузина Д.М., Потапов С.В., Кокодей Д.Ю. Петромагнетизм и палеомагнетизм кимберлитовых трубок Верхне-Мунского месторождения (Якутская алмазоносная провинция)	100
---	-----

К сведению авторов.....	129
-------------------------	-----



CONTENTS

Contents.....	5
Geophysics	
Dmitriev A.G., Dmitrieva M.A., Kovalev A.S. Dynamic range issues and image information content when visualizing seismic data.....	6
Geology, prospecting and exploration of solid minerals, minerageny	
Kovalev A.A., Karpov V.A., Makarov V.A., Padalko N.L. Using isotope-geochemical criteria for Olympiadinskoye gold deposit gas system genesis diagnosis.....	17
Skuzovatov S.Yu., Tarasova Yu.I. Sulfide mineralization in orogenic eclogites of the North Muya block (northeastern Transbaikalia): genesis and the first data on the isotopic composition of sulfur.....	35
Applied mining and petroleum field geology, geophysics, mine surveying and subsoil geometry	
Gilyazetdinov R.A., Kuleshova L.S., Mukhametshin V.V., Gizzatullina A.A. Factor analysis-based deep differentiation of oil deposits in the Ural-Volga region.....	44
Daniliev S.M., Shnyukova O.M. Development prospects of natural electromagnetic radiation recording technology to predict geodynamic phenomena in Norilsk mines.....	56
Kachor O.L., Trusova V.V., Gantimurova S.A., Goryachev I.N., Ikramov Z.L., Parshin A.V. The former industrial site of the Angarsk Metallurgical Plant (Svirsk, Russia) 10 years later: current geochemical state and interannual change analysis based on Earth remote sensing data	66
Pogrebnaia D.A., Vahromeev A.G. Rare metal concentration features at a caldera type deposit in the Miocene-Quaternary boron-lithium province of North America. Search for analogues	90
Khoroshikh M.S., Konstantinov K.M., Sharygin I.S., Kuzina D.M., Potapov S.V., Kokodey D.Yu. Petromagnetism and paleomagnetism of kimberlite pipes of the Verkhnemunskoe deposit (Yakutsk diamondiferous province).....	100
Information for the Authors.....	129



ГЕОФИЗИКА

Обзорная статья

УДК 550.834

EDN: DQCZBW

DOI: 10.21285/2686-9993-2024-47-1-6-16



Проблемы динамического диапазона и информативности изображения при визуализации сейсмических данных

А.Г. Дмитриев^{a✉}, М.А. Дмитриева^b, А.С. Ковалев^c^{a-c}Иркутский национальный исследовательский технический университет, г. Иркутск, Россия

Резюме. Цель данного обзора заключалась в рассмотрении проблемы визуализации сейсмических данных применительно к возможностям зрения человека на основе оценки динамического диапазона сигналов сейсморазведки. Были изучены пути увеличения информативности и эффективности способов визуализации относительно повышения их разрешающей способности. В результате анализа выяснено, что динамический диапазон сейсмических записей на 2–3 порядка превышает возможности человеческого глаза и на 4–5 порядков – технические средства визуализации. На примере наиболее универсальной аппаратно-аддитивной RGB-модели рассмотрены модели цветового зрения. Выбор модели основан на представлении о системе зрения человека как о совокупности светочувствительных клеток, реагирующих на красный, зеленый и синий цвета, и мозга, обрабатывающего и формирующего в сознании человека цветовой образ объекта. Установлены взаимосвязи между монохромным и цветным изображениями, воспринимаемыми человеческим глазом на основе нескольких видов чувствительных рецепторов. Сделан вывод, что при использовании цветного изображения информационные возможности значительно расширяются. Так, при монохромном способе вывода информации достаточно 8 ступеней серого, тогда как использование цветных устройств позволяет увеличить количество ступеней до 14. Методология решения данной проблемы заключается в использовании новых технологий, основанных на применении крупномасштабных и объемных изображений, обеспечивающих на основе расширения динамического диапазона значительное повышение значений светового потока, разрешения и контрастности, исходя из пределов возможности человеческого зрения.

Ключевые слова: динамический диапазон, монохромное, цветовое зрение, разрешающая способность, информативность, RGB-модель, визуализация, сейсмические данные

Для цитирования: Дмитриев А.Г., Дмитриева М.А., Ковалев А.С. Проблемы динамического диапазона и информативности изображения при визуализации сейсмических данных // Науки о Земле и недропользование. 2024. Т. 47. № 1. С. 6–16. <https://doi.org/10.21285/2686-9993-2024-47-1-6-16>. EDN: DQCZBW.

GEOPHYSICS

Review article

Dynamic range issues and image information content when visualizing seismic data

Alexander G. Dmitriev^{a✉}, Mariya A. Dmitrieva^b, Alexander S. Kovalev^c^{a-c}Irkutsk National Research Technical University, Irkutsk, Russia

Abstract. The purpose of this review is to discuss the problem of seismic data visualization in relation to human vision capabilities based on the seismic signal dynamic range assessment. The ways of increasing the information content and efficiency of visualization methods in terms of increasing their resolution are considered. The conducted analysis has shown that the dynamic range of seismic recordings exceeds the capabilities of the human eye by 2–3 orders of magnitude and the capabilities of technical visualization means by 4–5 orders of magnitude. Color vision models are considered on example of the most versatile hardware additive RGB color model. The model was chosen based on the idea of the human vision system as a set of photosensitive cones that register red, green and blue colors and the human brain, which processes and forms a color image in one's consciousness. The relationships between monochrome and color images perceived by the human eye based on several types of sensitive receptors have



been established. It is concluded that the use of a color image significantly expands information capabilities. Thus, 8 grey steps are enough for the monochrome method of information output, whereas the use of color devices allows to increase the number of steps up to 14. The methodology for solving this problem consists in the application of new technologies based on the use of large-scale and three-dimensional images providing a significant increase in the values of luminous flux, resolution and contrast based on the expansion of the dynamic range taking into consideration the limits of human vision.

Keywords: dynamic range, monochrome color vision, resolution, information content, RGB model, visualization, seismic data

For citation: Dmitriev A.G., Dmitrieva M.A., Kovalev A.S. Dynamic range issues and image information content when visualizing seismic data. *Nauki o Zemle i nedropol'zovanie = Earth sciences and subsoil use*. 2024;47(1):6-16. (In Russ.). <https://doi.org/10.21285/2686-9993-2024-47-1-6-16>. EDN: DQCZBW.

Введение

В настоящее время повысился интерес к цветной графике не только как к способу вывода сейсмической информации, но и как к методу обработки и интерпретации изображений. Поскольку имеется огромное количество цветов, их эффективный синтез, хранение и передача нуждаются в количественном обосновании, выработке соответствующих требований и методик их представления.

Большое значение для уверенного выделения, прослеживания и идентификации стратиграфических элементов на временных или глубинных сейсмических разрезах имеет оптимальный выбор способа и масштаба изображения. В настоящее время в арсенале обработчиков имеется несколько способов визуализации данных сейсморазведки. Основными из них является метод отклонений, переменных амплитуд (переменной ширины), комбинированный метод и метод переменной плотности в черно-белом или цветном вариантах^{1,2}. Кроме того, для повышения информативности отчетных материалов применяется метод цветового кодирования, при котором на сейсмограммы накладываются в соответствующих цветовых градациях такие сейсмические атрибуты, как амплитуда, частотный диапазон, фазовые или скоростные характеристики с привязкой к определенным интервалам временных или глубинных разрезов.

Анализ динамического диапазона монохромного и цветного изображений

Главной характеристикой, определяющей разрешающую способность каждого метода визуализации, является динамический диапазон человеческого глаза D_{HS} , dB. Данный диапазон можно найти по формуле

$$D_{HS} = 20 \lg \left(\frac{A_{max}}{A_{min}} \right),$$

в которой A_{max} и A_{min} – максимальная и минимальная амплитуды сигнала соответственно.

В эпоху аналоговой регистрации основными методами визуализации были методы отклонений и переменной плотности в черно-белом варианте. При использовании метода отклонений динамический диапазон глаза человека с нормальным зрением при прямом солнечном освещении, по самым оптимистичным оценкам, определяется способностью наблюдать на расстоянии вытянутой руки синусоиду амплитудой $A_{min} = 1$ мм, наложенную на синусоиду амплитудой $A_{max} = 1$ м, что составляет 60 dB, или разницу в 100 раз. Подобное условие связано с величиной комфортного расстояния при чтении с возможностью адаптации сканирования в полной мере в едином цикле рассмотрения (стробирования) рисунка глазом.

В реальности при использовании комбинированного способа переменной ширины, реализуемого путем однотонового зачернения положительных или отрицательных значений амплитуд, при расстоянии между сейсмическими трассами на временных разрезах 10 мм динамический диапазон не превышает 26 dB.

Более широкими возможностями обладает метод переменной плотности или тонокодирования, реализуемый путем зачернения, степень которого определяется амплитудой сигнала. Основной единицей измерения степени зачернения в фотографии является двоичная f -ступень f_{st} , соответствующая яркости в один кандел на квадратный метр (cd/m^2). При монохромном изображении динамический диапазон определяется контрастностью, то есть

¹ Шерифф Р.Е. Англо-русский энциклопедический словарь терминов разведочной геофизики. М.: Недра, 1984. 351 с.

² Англо-русский энциклопедический словарь по геофизике / авт.-сост. А. В. Михальцев и др.; отв. ред. В. А. Ерхов. М.: Агентство ЭМП; Геодар, 2009. 940 с.



соотношением яркостей наиболее светлого (уровень белого) и наиболее темного (уровень черного) предмета на плоскости изображения в степенях двойки (рис. 1). Иначе говоря, на временном разрезе с динамическим диапазоном яркости в $8 f_{st}$ – белый цвет в $2^8 = 256$ раз, то есть на 48 dB ярче черного.

Зрение человека является предметом пристального изучения уже довольно длительное время. В настоящее время накоплена обширная база экспериментальных данных о его свойствах, что позволяет сделать ряд важных и интересных заключений о тех или иных конкретных ситуациях. Однако этих данных еще недостаточно для построения исчерпывающей математической модели зрения.

Глаз человека, как естественный приемник оптического излучения, является великолепной системой. Наши глаза дают нам возможность воспринимать размеры, форму, фактуру, блеск, прозрачность, мерцание, цвет объектов и т. п. Конечно, он не обладает такой зоркостью, как глаз орла или чувствительностью, как глаз совы. Динамический диапазон зрения человека лежит в пределах от 2^{-6} до 2^8 cd/m², что составляет $14 f_{st}$ (90 dB). Правда мы не можем воспринимать свет всего этого

диапазона одновременно. Зрение должно постепенно настроиться на нужный диапазон изменения освещенности, от солнечного дня к безлунной ночи. Максимальный диапазон интенсивностей, доступных глазу человека в одно время – около 2^6 – $2^8 f_{st}$. Это мгновенный динамический диапазон нашего глаза (при неизменной ширине зрачка), который можно получить при детальном рассмотрении одного участка разреза, не глядя никуда более и дав глазам настроиться (рис. 2) [1].

Приспособливание зрения к более широкому диапазону освещенности осуществляется посредством механизма, известного как адаптация. Когда вы входите с улицы в темное помещение, требуется некоторое время, чтобы глаза вновь обрели способность видеть. Аналогично при смене темного окружения на светлое зрению также потребуется время для адаптации. Известно, что человек отдельно фиксирует интенсивность (яркость) и цвет света. Это обусловлено двумя типами рецепторов сетчатки глаза – палочками и колбочками.

Палочки регистрируют изменение интенсивности освещения и практически нечувствительны к цвету – это ахроматическое или «ночное» зрение. Палочки активны при малых интенсив-

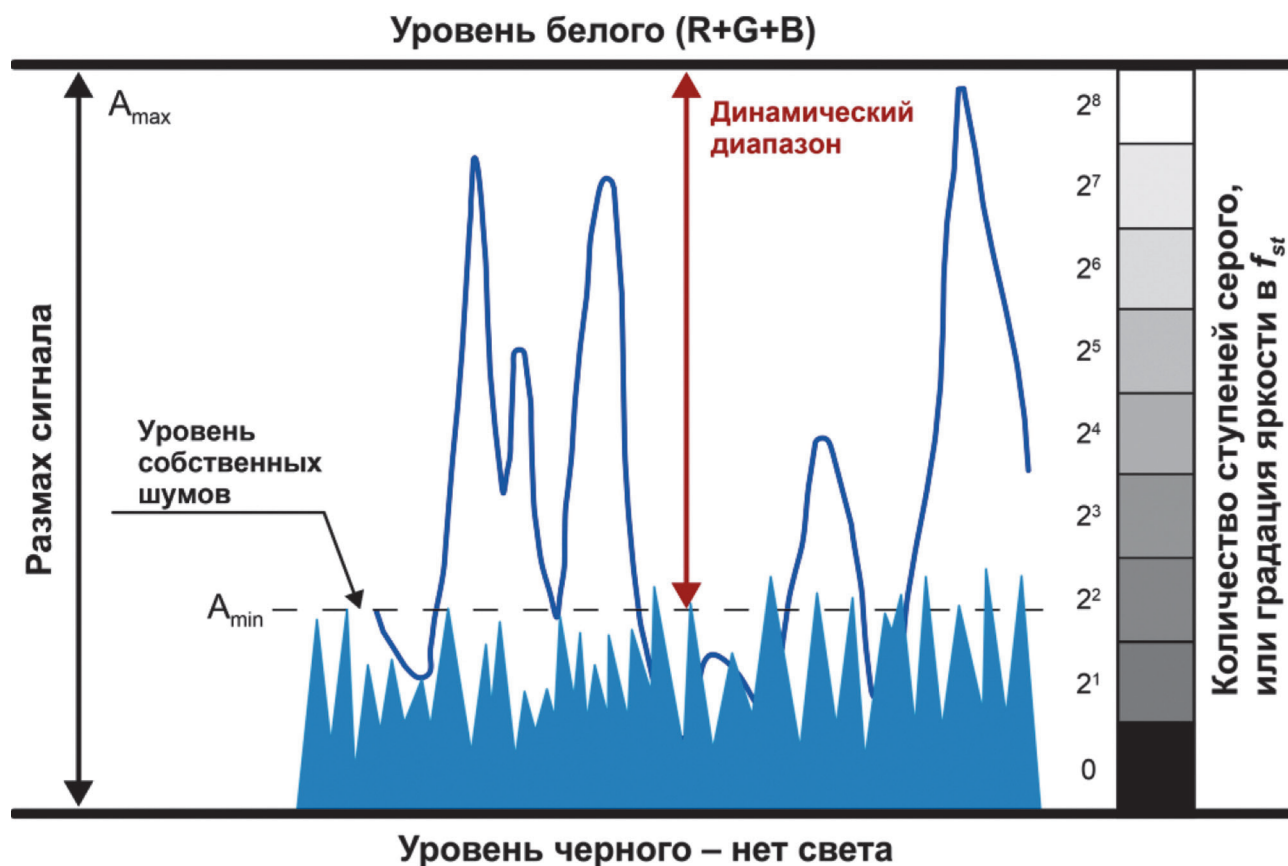


Рис. 1. Динамический диапазон монохромного изображения в f -ступенях
Fig. 1. Dynamic range of a monochrome image in f -stops

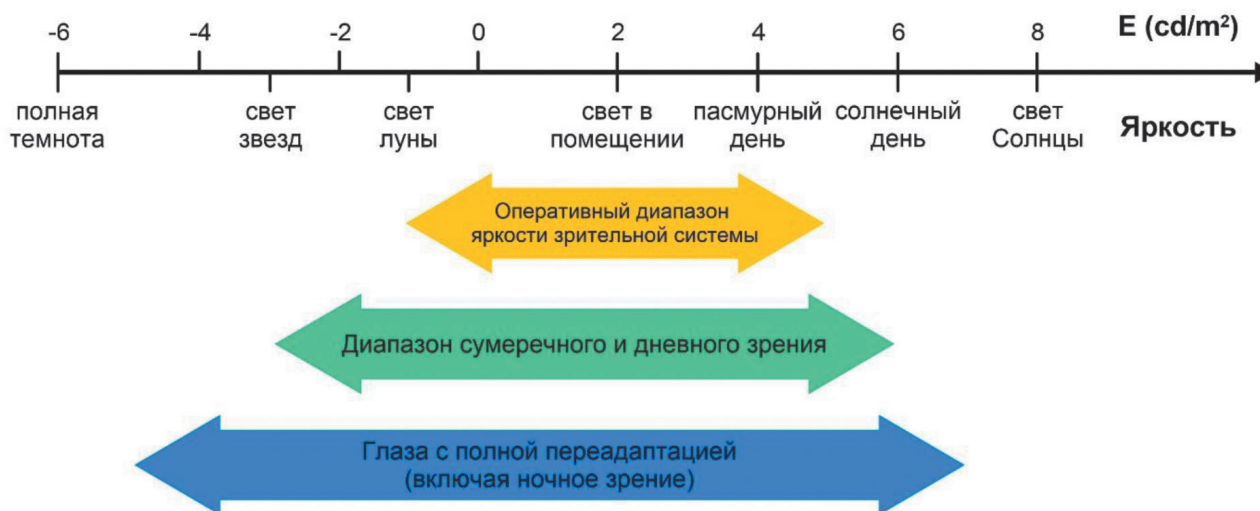


Рис. 2. Диапазоны яркостей зрительной системы человека
Fig. 2. Brightness ranges of the human vision system

ностях цвета в диапазоне от 2^{-6} до 2^{-2} cd/m^2 . Этот интервал получил название scotopic. Колбочки, отвечая за чувствительность к цвету, очень слабо реагируют на изменение его интенсивности – это хроматическое или цветное зрение, которое активно в диапазоне интенсивности освещения в пределах от 2^{+2} до 10^{+8} cd/m^2 . Этот интервал интенсивностей получил название photopic. Область, в которой активны оба типа рецепторов, а зрение одинаково хорошо фиксирует и цвет, и его интенсивность, лежит в пределах от 2^{-2} до 2^{+2} cd/m^2 и называется mesopic. Таким образом, для человека цвет практически неразличим при темном освещении, а при ярком свете мы очень плохо различаем его интенсивность – это основная причина того, что мы не можем видеть звезды днем.

Считается, что человеческий глаз в зависимости от скорости адаптации зрения в реальном диапазоне изменения освещенности подчиняется психофизическому закону Вебера – Фехнера, который гласит: «Полное зрительное ощущение яркости E пропорционально логарифму интенсивности (силе) I падающего в глаз света»³:

$$E = \frac{1}{S} \log_2 I + C \left(\frac{\text{cd}}{\text{m}^2} \right),$$

где S – площадь, m^2 ; C – постоянная, зависящая от адаптационных способностей глаза. Подобный подход позволяет оценить возможности зрения человека в достаточно широких пределах и считать, что человеческий глаз, в зависимости от скорости адаптации зрения в

реальном диапазоне изменения освещенности, может воспринимать динамический диапазон от 6 до $20 f_{st}$. Наиболее аргументированным можно считать диапазон порядка 12–16 f -ступеней (рис. 3). Другими словами, на временном черно-белом разрезе с градацией зачернения в $14 f_{st}$ белый цвет ярче черного в 16384 раза [2]. Это, в зависимости от особенностей зрения, соответствует динамическому диапазону 84 dB. Данный диапазон значительно превосходит соответствующие параметры практически всех современных технических устройств, величина которых не превышает $6-7 f_{st}$.

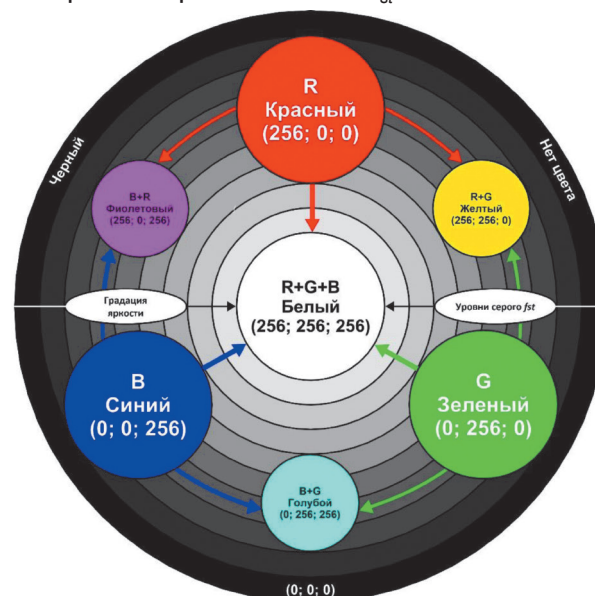


Рис. 3. Аддитивная аппаратно-зависимая RGB-модель цветового зрения
Fig. 3. An additive hardware-dependent RGB color vision model

³ Недзведь О.В., Лещенко В.Г. Оптика глаза. Основы биофизики зрения: учеб.-метод. пособие. Минск: Изд-во БГМУ, 2008. 35 с.



При использовании цветного изображения информационные возможности расширяются. Цвет – одно из свойств объектов материального мира, воспринимаемое как зрительное ощущение. Под цветовосприятием понимают способность дифференцировать различные длины волн и их композиции. Цвет характеризуется такими свойствами, как цветовой тон (длина волны), яркость и насыщенность, которые могут быть измерены соответствующими инструментами. Наиболее важный атрибут цвета – цветовой тон, который может быть «чистым» или «смешанным», когда получаются разные оттенки цвета. Насыщенность – соотношение в составе цвета основного цветового тона и равного ему по яркости бесцветного белого³.

В настоящее время существует множество специализированных и универсальных систем анализа цветов. Примерами таких систем являются: «Словарь цвета Мэрца и Пауля» (1930), цветовая система Нью-Хью, разработанная Фоссом (1946), «Руководство по цветовой гармонии», основанная на системе Освальда (1948), цветовая карта DIN, разработанная М. Рихтером, которая является официальным немецким стандартом (1950), шведская система естественных цветов, основанная на модели Геринга – Иогансона и доведенная Р. Хантером до практического воплощения в виде атласа цветов (1966). В 1973 г. ассоциация полиграфистов предложила новую карту цветов, называемую «Цветовой системой Фосса». Существует множество специализированных цветовых систем-карт: для красок, почв, минералов, нефти, дыма, масел и т. п. [3]. Однако одним из наиболее общепринятых стандартов цвета является атлас цветов Манселла [4].

В теории цвета существует несколько моделей. Наиболее универсальными моделями описания изображений являются цветовые модели RGB и CMYK. Аддитивная аппаратно-зависимая RGB-модель разрабатывалась для таких устройств отображения, как электронно-лучевые трубки, плазменные или матричные жидкокристаллические дисплеи, мультимедиа проекторы. Поэтому RGB-модель используется в системах, построенных на излучении света, что делает ее самой распространенной, с ней работают все экраны. В соответствии с этой моделью любой цвет может быть получен смешением трех основных (чистых) цветов. Цвета считаются основными, если ни один из них нельзя получить смешени-

ем двух других. Можно создать множество вариантов трех основных цветов, но чаще всего в качестве таковых берутся цвета: красный – R, зеленый – G и синий – B с подобранными соответствующим образом интенсивностями. Вероятнее всего, это обусловлено тем, что по современным представлениям система человеческого зрения состоит из светочувствительных колбочек, регистрирующих красный, зеленый и синий цвета, и мозга, который суммирует, обрабатывает и формирует в нашем сознании цветовой образ. Таким образом, восприятие цвета является сложнейшим психофизиологическим процессом.

В модели RGB цвета определяются как смесь стандартизированных линейно независимых базисных функций, известных под названием функций основных цветов или тристиmulных величин. Отображение трехцветных механизмов в зрительной RGB-системе можно представить как комбинацию функций основных цветов. Согласно этой модели, черный цвет представляется как (0, 0, 0), то есть полное отсутствие света. Смешение равных значений трех компонентов дает различные оттенки серого. При максимальной интенсивности трех основных цветов (256, 256, 256) формируется белый свет [1]. При смешении в различных пропорциях основных цветов получаются все остальные. Например, при смешении красного и зеленого получаем желтый (см. рис. 3).

Восприятие сигналов соответствует различным уровням серого, начиная от черного до белого. Считается, что около восьми уровней серого достаточно для отображения приблизительно 95 % всей информации, представленной в тонокодированном виде. Интенсивность каждого основного цвета представляется в виде 256 оттенков (градаций интенсивности). Число 256 довольно произвольно и появилось в результате компромисса между производительностью графической подсистемы компьютера, требованием фотореалистичности изображений и двоичной природой компьютерных вычислений. В частности, в результате исследований было выяснено, что 16,77 млн оттенков (256×256×256) вполне достаточно (144 dB) для передачи изображений самого высокого фотографического качества. К тому же 256 довольно просто кодируется в двоичной системе как 2^8 , то есть один байт. К этой особенности, вероятно, относится и оценка диапазона зрения человека в $14 f_{st}$, что со-



ответствует двухбайтовому числу. Следует отметить, что данная система в природе не единственная. Так, у стрекоз выявлена пентастимульная система, дополнительно регистрирующая, кроме видимого света, ультрафиолетовую и инфракрасную части спектра.

Модель CMYK задает пропорции смешиваемой краски на листе бумаги. Цветовое пространство CMYK – субтрактивное: если сложить все цветовые компоненты, то итоговый цвет будет черным. По этому же принципу работают обычные краски, а потому пространство CMYK используется исключительно в полиграфии. Через процентные соотношения в нем записаны пропорции смешения четырех красок: бирюзовой (Cian), пурпурной (Magenta), желтой (Yellow) и черной (Key color, black). Интенсивность каждого цвета задается в процентах от 0 до 100. Однако следует отметить, что данное число во многом произвольное. Так, искусствоведы свидетельствуют, что Рембрандт при написании картин всегда использовал только 10 цветовых компонентов (красок), смешивание которых обеспечивало всю требуемую ему цветовую гамму.

Одна из проблем пространств RGB и CMYK состоит в том, что это просто набор значений, которыми должно оперировать устройство вывода: принтер или экран. Реальное отображение цвета, заданного в RGB и CMYK, зависит от множества факторов. При печати – от качества краски и печатного оборудования, плотности бумаги, влажности воздуха и т. п. На экранах – от качества монитора и его калибровки, мощности лампы в проекторе и т. п. Не говоря уже о том, что на фактическое восприятие цвета глазом существенно влияет внешнее освещение.

Аддитивной, но аппаратно-независимой является цветовая модель CIE 1976 L*a*b (LAB), которая в настоящее время является международным стандартом. LAB – это аббревиатура из названий трех координат. Первая L – координата, которая отвечает только за светлоту (яркость), которую можно изменять от «самое темное – 0» до «самое светлое – 100». A – координата, определяющая положение цвета в диапазоне от зеленого до красного. B – координата задающая значение от синего до желтого. Таким образом, получается, что светлота задается отдельно от тона и насы-

щенности. В связи с тем, что LAB – аппаратно-независимая система и определяет цвет однозначно, она в основном применяется как промежуточное цветовое пространство, через которое происходит конвертирование цвета между другими цветовыми пространствами. Например, LAB по умолчанию используется в Adobe Photoshop [5]. К тому же LAB, благодаря возможности отдельно воздействовать на светлоту и очень широкому цветовому охвату, широко используется в программах цветовой коррекции. Данная модель имеет цветовой охват, настолько превосходящий охват модели RGB, что появился термин «скрытые цвета», то есть цвета, которые не видит человеческий глаз. Однако возможности данного явления пока не определены.

Практически любой цветовой сигнал, несмотря на его модель, может быть сопоставлен с одним из образцов атласа Манселла, в которых для различных категорий пользователей дан набор визуально очень близко расположенных образцов в диапазоне оттенков от 10 до 32 f_{st} . Г. Буксгаум и С. Бедроян [2] вывели эмпирическую зависимость между диапазоном уровней f_{st} и количеством цветовых оттенков N :

$$N \approx 0,074 f_{st}^3.$$

Исходя из данной зависимости, при 14 f -ступенях зрительная система человека обеспечивает восприятие примерно 200 цветов. Специалисты считают, что обычный человек в состоянии различить от 150 до 800 цветов в зависимости от особенностей зрения. В то же время имеются исключения. Историки утверждают, что великий русский художник И.Е. Репин различал до 1200 оттенков различных цветов, что соответствует 25 f_{st} .

Результаты исследования и их обсуждение

Однако все не так просто. Анкетирование 50 студентов по количеству определяемых оттенков на цветовом тесте (рис. 4) показало, что цветовое восприятие – это самый сложный психофизиологический процесс. Тест⁴ с различным количеством цветов в каждом ряду был отпечатан на глянцевого фотобумаге на высококачественном профессиональном цветном фотопринтере.

⁴ Войцеховский А.Г. Красочный мир // Youtube. Режим доступа: <https://youtu.be/2gwa1mpxEPM> (дата обращения: 15.12.2023).

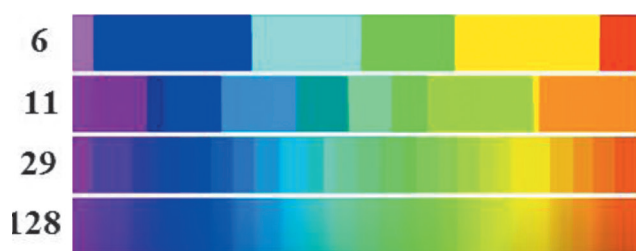


Рис. 4. Четырехрядный цветовой тест
Fig. 4. Four row color test

Практически все анкетированные точно определили количество цветов равное 6 в первом ряду (нет фиолетового). Только один испытуемый, в качестве реакции на вводную информацию о том, что спектр белого состоит из 7 компонент, разделил широкую синюю полосу на 2 оттенка. 94 % анкетированных правильно определили количество цветов во втором ряду. Количество же цветов в третьем и четвертом рядах, содержащих 29 и 128 оттенков соответственно, не определил ни один из анкетированных. Своеобразная «недостача цветности» колебалась от 3 до 8 оттенков.

Результаты тестирования показывают, что количество обычно используемых цветов намного превышает то, которое требуется для представления изображений. Это позволяет сделать некоторые методические выводы. При монохромном (черно-белом) способе вывода информации достаточно 8 f_{st} серого. В случае использования высококачественных цветных устройств количество f_{st} может быть увеличено до 14. Дальнейшее увеличение оттенков на градиентных цветовых шкалах практически бессмысленно (см. рис. 4).

На рис. 5 на одном и том же временном разрезе приведены различные способы визуализации. Визуализация осуществлялась с использованием системы обработки RadExPro, которая обладает не самым многофункциональным набором способов. Разрез получен по результатам 12-кратного профилирования с использованием фланговой системы наблюдений методом общей глубинной точки при расстоянии между одиночными сейсмоприемниками в 10 м и возбуждении упругих колебаний кувалдой. Участок характеризуется сложным тектоническим строением,

горным рельефом и развитием многолетней мерзлоты.

При подобной геологической обстановке традиционный способ визуализации – комбинированный метод переменной ширины в монохромном варианте (см. рис. 5, а), который характеризуется небольшим динамическим диапазоном и плохо иллюстрирует особенности волнового поля. При высокой плотности сейсмотрасс динамический диапазон на 1 мм разреза составляет всего 6 dB. На разрезах превалирует эффект клиппирования, оси синфазности отражающих горизонтов в целевом интервале глубин прерывисты, а наличие интенсивных дифрагированных волн затрудняют расшифровку волновой картины. Это не значит, что данные способы использовать нецелесообразно. Просто необходимо повышение информативности изображения, что возможно за счет применения метода переменной плотности (см. рис. 5, б). В полихромном варианте при цветовой гамме в 14 f_{st} данный метод обеспечивает динамический диапазон 46 dB.

В настоящее время используются два способа применения цвета. Первый обеспечивает формирование изображений по схеме градиентов, второй – на контрастной основе⁵. Подобные приемы позволяют существенно повысить информативность отчетных материалов.

Способ градиентов целесообразно применять в случае необходимости анализа закономерностей изменения амплитуд, характера целостности и формы изображения объектов (см. рис. 5, б). В этом случае имеется возможность наложения на сейсмотрассы в соответствующих цветовых градациях сейсмических атрибутов (энергия, частота, фаза, скорость и т. п.) с привязкой к определенным интервалам временных или глубинных разрезов. Подобный прием позволяет осуществлять корректную идентификацию и привязку цифровых значений сейсмических атрибутов к шкале оттенков цвета, то есть формировать своеобразную интерпретационную легенду соответствия [6]. На рис. 5, с приведен разрез с использованием метода градиентного цветового кодирования с наложением скоростных характеристик. На разрезе однозначно выделяются две зоны. Первая (CDP 700-1100)

⁵ Бондарев В.И., Крылатков С.М. Сейсморазведка: учебник для вузов. Т. 2. Обработка, анализ и интерпретация данных. Екатеринбург: Изд-во УГГА, 2011. 408 с.

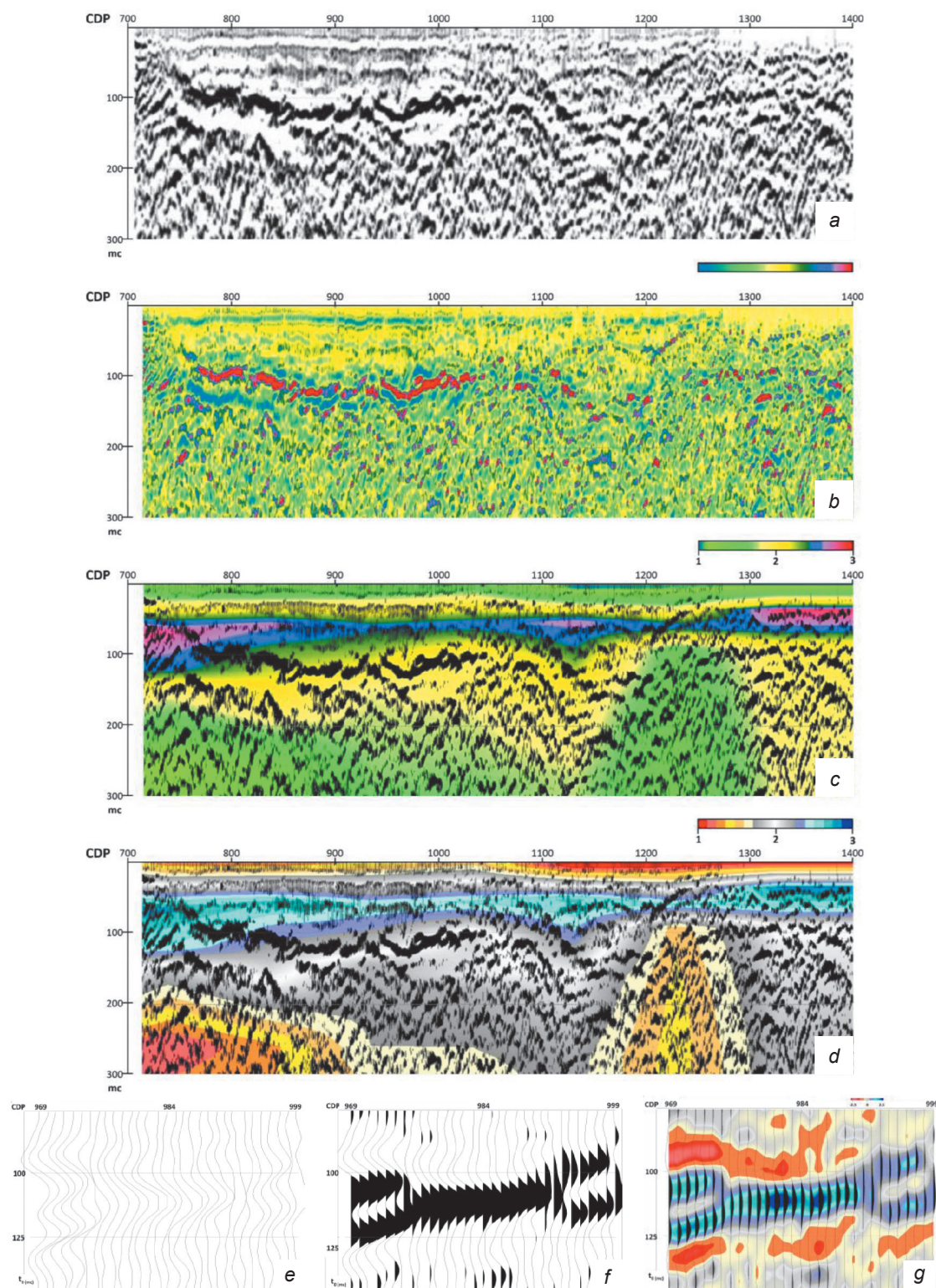


Рис. 5. Изображение временных разрезов:

a – монохромным методом переменной ширины; *b* – полихромным методом переменной плотности; *c* – с наложением скоростных характеристик градиентным методом цветового кодирования; *d* – с наложением скоростных характеристик контрастным методом цветового кодирования; *e–g* – фрагментированные временные разрезы: *e* – методом переменных амплитуд, *f* – комбинационным методом переменной ширины, *g* – комбинационным полихромным методом переменной плотности

Fig. 5. Time section displays:

a – monochrome variable width method; *b* – polychrome variable density method; *c* – with superimposition of velocity characteristics using a gradient color coding method; *d* – with superimposition of velocity characteristics using a contrast color coding method; *e–g* – time sections fragmented by: *e* – a variable amplitude method, *f* – a combined variable width method, *g* – a combined polychrome variable density method



соответствует развитию субгоризонтальных образований, вторая (CDP 1100-1400) характеризуется наличием интенсивных вертикальных неоднородностей. Подобное районирование позволяет на стадии детальной обработки выбрать оптимальную плотность расчета вертикальных спектров скоростей и применять наиболее корректные процедуры интерпретации, целесообразные для каждого типа разреза.

Необходимость увеличения градаций цветности предусматривает использование способа контрастов, который основан на введении разграничительных изолиний между оттенками. Для корректного отображения цветом подчеркиваемых характеристик необходимо тщательно подбирать число цветов с последующим формированием шкалы их соответствия со значениями атрибутов. Поскольку большинство современных систем обработки сейсмической информации не имеют такой опции, обработчики редко используют этот критерий, останавливаясь на выборе цветовых параметров «по умолчанию». В этом случае целесообразно применение псевдо-градиентного способа, при котором цветовая гамма соседних цветов на шкалах соответствует не последовательному изменению частоты зрительного сигнала от красного до фиолетового, а близким расположением на шкале заведомо контрастных по отношению друг к другу оттенков (см. рис. 5, d).

Однако человеческое зрение, несмотря на уникальные способности некоторых индивидуумов, все равно не позволяет охватить весь динамический диапазон регистрируемых сейсмических сигналов, который достигает 160 dB. В связи с этим широко используются различные приемы сужения динамического диапазона сигнала до визуализации, такие как мьютинг, масштабирование, фильтрация, различные способы регулировки усиления и т. п. Более объективные результаты дают последовательный вывод данных (своеобразные переборы) при различных масштабах визуализации, а также использование комбинированных способов вывода информации в разном их сочетании.

В связи с этим наиболее ответственные этапы обработки и интерпретации целесообразно анализировать путем вывода времен-

ных и глубинных разрезов на большие экраны с помощью высоко разрешающих проекторов. Подобные приемы позволяют обработчику целенаправленно фокусировать взгляд на отдельных элементах разреза, обеспечивают возможность выявления тонких амплитудных аномалий с последующим фрагментированием их изображения в более крупном масштабе (см. рис. 5, e–g).

Заключение

Используемая сегодня для представления изображений тристимульная аддитивная аппаратно-зависимая RGB-модель с дискретными интенсивностями низкого динамического диапазона (256:1) описывается целыми числами (8 бит/канал), которые не являются реальными (метрическими) линейными величинами светимости. Такое описание получило название LDRI (Low Dynamic Range Image). Но все же по косвенным признакам эта модель позволяет определить «мегапиксельность» и другие характеристики человеческого глаза. И такие исследования в настоящее время проводятся.

В качестве примера дальнейшего развития подобного подхода можно привести использование особых помещений – вижнариумов (*от англ.: visionarium*), в которых в нескольких перпендикулярных плоскостях располагаются плоские экраны. Так, в специализированном зале фирмы Paradigm Geophysical компьютерная система управляет работой 4000 проекторов, что обеспечивает формирование объемного изображения. Интерпретатор, находясь в таком помещении, вполне осязаемо ощущает себя внутри исследуемой среды, где на стенные экраны в цвете проецируются временные или глубинные разрезы.

Естественно, подобные системы стоят дорого. Однако в настоящее время имеются альтернативные современные системы. Речь идет о лазерных TV-проекторах премиум-класса, которые работают по технологии DPL. Они обеспечивают передачу информации в формате HDR (High Dynamic Range Image) при разрешении 4K, световом потоке свыше 5000 лм и контрастности изображения с динамическим диапазоном до 120 dB. Подобные системы позволяют формировать даже уличные изображения.



Список источников

1. Banterle F., Artusi A., Debattista K., Chalmers A. *Advanced High Dynamic Range Imaging*. Boca Raton: CRC Press, 2011. 352 p. <https://doi.org/10.1201/b11373>.
2. Буксгаум Г., Бедросян С.Д. Зависимость количества цветов от числа уровней серого: количественное соотношение // Труды института инженеров по электротехнике и радиоэлектронике. 1984. Т. 72. № 10. С. 213–215.
3. Джадд Д., Вышецки Г. Цвет в науке и технике / пер. с англ. М.: Мир, 1978. 592 с.
4. Munsell A.H. *Atlas of the Munsell color system*. Boston: Wadsworth, Howland & Co., Inc., Printers, 1915. 42 p.
5. Маргулис Д. Photoshop для профессионалов: классическое руководство по цветокоррекции / пер. с англ. М.: Интелбук, 2007. 656 с.
6. Brown A.R. *Interpretation of three-dimensional seismic data*. Tulsa: American Association of Petroleum Geologists, 2004. 542 p.

References

1. Banterle F., Artusi A., Debattista K., Chalmers A. *Advanced High Dynamic Range Imaging*. Boca Raton: CRC Press; 2011, 352 p. <https://doi.org/10.1201/b11373>.
2. Buxgaum G., Bedrosyan S.D. Dependence of the number of colors on the number of grey levels: quantitative relationship. *Trudy instituta inzhenerov po ehlektrotekhnike i radioehlektronike*. 1984;72(10):213-215. (In Russ.).
3. Judd D., Wyszecki G. *Color in Business, Science, and Industry*; 1975, 576 p. (Russ. ed.: *Tsvet v nauke i tekhnike*. Moscow: Mir; 1978, 592 p.).
4. Munsell A.H. *Atlas of the Munsell color system*. Boston: Wadsworth, Howland & Co., Inc., Printers; 1915, 42 p.
5. Margulis D. *Professional Photoshop: the classic guide to color correction*; 2002, 512 p. (Russ. ed.: *Photoshop dlya professionalov: klassicheskoe rukovodstvo po tsvetokorreksii*. Moscow: Intelbook; 2007, 656 p.).
6. Brown A.R. *Interpretation of three-dimensional seismic data*. Tulsa: American Association of Petroleum Geologists; 2004, 542 p.

Информация об авторах / Information about the authors



Дмитриев Александр Георгиевич,
доктор геолого-минералогических наук, профессор,
профессор-консультант департамента геофизики,
институт «Сибирская школа геонаук»,
Иркутский национальный исследовательский технический университет,
г. Иркутск, Россия,
✉ a.g.dmitriev@geo.istu.edu
<https://orcid.org/0000-0002-9178-1169>
Alexander G. Dmitriev,
Dr. Sci. (Geol. & Mineral.), Professor,
Consulting Professor of the Geophysics Department,
Siberian School of Geosciences,
Irkutsk National Research Technical University,
Irkutsk, Russia,
✉ a.g.dmitriev@geo.istu.edu
<https://orcid.org/0000-0002-9178-1169>



Дмитриева Мария Алексеевна,
студент,
институт «Сибирская школа геонаук»,
Иркутский национальный исследовательский технический университет,
г. Иркутск, Россия,
dmitrieva.mariya1@yandex.ru
<https://orcid.org/0009-0004-1830-3648>
Mariya A. Dmitrieva,
Student,
Siberian School of Geosciences,
Irkutsk National Research Technical University,
Irkutsk, Russia,
dmitrieva.mariya1@yandex.ru
<https://orcid.org/0009-0004-1830-3648>



Ковалев Александр Сергеевич,
студент,
институт «Сибирская школа геонаук»,
Иркутский национальный исследовательский технический университет,
г. Иркутск, Россия,
aleks.merser2406@mail.ru
<https://orcid.org/0009-0006-0829-2038>
Alexander S. Kovalev,
Student,
Siberian School of Geosciences,
Irkutsk National Research Technical University,
Irkutsk, Russia,
aleks.merser2406@mail.ru
<https://orcid.org/0009-0006-0829-2038>

Вклад авторов / Contribution of the authors

А.Г. Дмитриев – постановка задачи, разработка концепции статьи, методологическое обеспечение, анализ материалов, написание текста статьи.

М.А. Дмитриева – подбор и анализ литературы, формирование концепции визуализации графической части статьи, анализ и обсуждение результатов, написание текста статьи.

А.С. Ковалев – обработка полученных сейсмических данных, подбор графа обработки и способов вывода информации, обсуждение результатов, написание текста статьи.

Alexander G. Dmitriev defined the problem, developed the concept of the article, provided the methodological support, analyzed the material and wrote the text of the article.

Mariya A. Dmitrieva selected and analyzed the literature, formed the concept of article graphics visualization, analyzed and discussed the results, wrote the text of the article.

Alexander S. Kovalev processed the obtained seismic data, selected a processing graph and methods for data output, discussed the results, wrote the text of the article.

Конфликт интересов / Conflict of interests

Авторы заявляют об отсутствии конфликта интересов.
The authors declare no conflict 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 19.12.2023; одобрена после рецензирования 19.02.2024; принята к публикации 26.02.2024.

The article was submitted 19.12.2023; approved after reviewing 19.02.2024; accepted for publication 26.02.2024.



ГЕОЛОГИЯ, ПОИСКИ И РАЗВЕДКА ТВЕРДЫХ ПОЛЕЗНЫХ ИСКОПАЕМЫХ, МИНЕРАГЕНИЯ

Научная статья

УДК 553.41:551.2.01(571.51)

EDN: MFIMTQ

DOI: 10.21285/2686-9993-2024-47-1-17-34



Применение изотопно-геохимических критериев при диагностике генезиса газовых систем Олимпиадинского золоторудного месторождения

А.А. Ковалев^a, В.А. Карпов^b, В.А. Макаров^c, Н.Л. Падалко^d

^aООО Центр геотехнологических исследований «Прогноз», г. Красноярск, Россия

^bАО «Полюс Красноярск», г. Красноярск, Россия

^cСибирский федеральный университет, г. Красноярск, Россия

^dАО «Сибирский научно-исследовательский институт геологии,
геофизики и минерального сырья», г. Новосибирск, Россия

Резюме. Авторами исследованы современные газопроявления, пространственно сопряженные с рудными месторождениями Каитъбинской литолого-фациальной зоны Енисейского кряжа. Цель данного исследования заключалась в получении научно обоснованных данных о генезисе газообразных и парообразных флюидов различных природных сред опробования карьера «Восточный» Олимпиадинского золоторудного месторождения: горных пород, природных вод, газов свободного выделения из буровзрывных скважин и воздуха приземной атмосферы. Выполнен комплекс полевых и аналитических работ: дегазация, газовая хроматография, пиролиз органического вещества литифицированных и метаморфизованных отложений, анализ изотопного состава углерода углекислого газа и метана флюидальных систем. Для изучения нормального газо-геохимического поля (естественного фона) района работ проведена атмо-геохимическая съемка на эталонном участке, экологически «чистом» полигоне с минимальным влиянием техногенных факторов. Установлено, что приземная атмосфера полигона обязана своим формированием ландшафтным и геоморфологическим условиям участка Каитъбинской литолого-фациальной зоны, флюидальным системам глубоких горизонтов, которые благодаря наличию разветвленной сети дизъюнктивных нарушений и диффузионно-фильтрационным процессам массопереноса достигли зоны поискового геохимического зондирования. В результате пиролитических исследований пород доказано, что в пределах вскрытого разреза карьера «Восточный» органическое вещество отложений кординской свиты нижнего рифея реализовало свой нефтегазогенерационный потенциал и не может служить источником формирования аномальных газовых полей Олимпиадинского месторождения. Изученные газовые системы имеют полигенную природу, являются аллохтонными по отношению к вмещающим отложениям, сформированы без участия газов верхней газогенерирующей (био)зоны, по изотопно-геохимическим критериям это главным образом эндогенные и нафтидогенные флюиды, идентичные газоконденсатным скоплениям Юрубчено-Тохомской зоны нефтегазоаккумуляции.

Ключевые слова: газовые системы, газопроявления, генезис, Енисейский кряж, изотопные исследования, нефтегазогенерационный потенциал, органическое вещество пород, Олимпиадинское месторождение

Для цитирования: Ковалев А.А., Карпов В.А., Макаров В.А., Падалко Н.Л. Применение изотопно-геохимических критериев при диагностике генезиса газовых систем Олимпиадинского золоторудного месторождения // Науки о Земле и недропользование. 2024. Т. 47. № 1. С. 17–34. <https://doi.org/10.21285/2686-9993-2024-47-1-17-34>. EDN: MFIMTQ.

GEOLOGY, PROSPECTING AND EXPLORATION OF SOLID MINERALS, MINERAGENY

Original article

Using isotope-geochemical criteria for Olympiadinskoye gold deposit gas system genesis diagnosis

Artem A. Kovalev^a, Victor A. Karpov^b, Vladimir A. Makarov^c, Nataliy^a L. Padalko^d

^aLLC CGI “Prognoz”, Krasnoyarsk, Russia

^bJSC “Polyus Krasnoyarsk”, Krasnoyarsk, Russia

^cSiberian Federal University, Krasnoyarsk, Russia

^dJSC “SNIGG and MS”, Novosibirsk, Russia

© Ковалев А.А., Карпов В.А., Макаров В.А., Падалко Н.Л., 2024



Abstract. The authors studied modern gas manifestations spatially associated with the ore deposits in the Kaitbinskaya lithological-facies zone of the Yenisei Ridge. The purpose of the research is to obtain scientifically based data on the genesis of gaseous and vaporous fluids in various sampling environments of the Vostochny open-pit mine of the Olympiadinskoye gold deposit: rocks, natural waters, free-flowing gases from blastholes and air of the surface atmosphere. It has been conducted a complex of field and analytical works including degassing, gas chromatography, pyrolysis of the organic substance of lithified and metamorphosed deposits, analysis of carbon isotopic composition in carbon dioxide and methane in fluidal systems. In order to study normal gas-geochemical field (natural background) of the work area an atmospheric geochemical survey was carried out at the reference site – an “environmentally friendly” site with the minimal influence of technogenic factors. It has been determined that the surface atmosphere of the site had been formed due to the landscape and geomorphological conditions of the Kaitbinskaya lithological-facies zone as well as fluidal systems of deep horizons. The latter, due to the presence of an extensive network of disruptive disturbances and diffusion-filtration processes of mass transfer reached the zone of exploratory geochemical sounding. The conducted pyrolytic studies of rocks have proved that within the open section of the Vostochny open-pit mine the organic substance of the Kordinskaya series of the lower Riphean deposits has implemented its oil and gas generation potential and cannot serve the formation source of abnormal gas fields of the Olympiadinskoye gold deposit. The studied gas systems are polygenic in nature and, being allochthonous to the host sediments, are formed without the participation of gases from the upper generating (bio) zone. According to isotope-geochemical criteria, these are mainly endogenous and naphthidogenic fluids identical to the gas condensate accumulations of the Yurubcheno-Tokhomskaya oil and gas accumulation zone.

Keywords: gas systems, gas manifestations, genesis, Yenisei Ridge, isotope studies, oil and gas generation potential, organic substance of rocks, Olympiadinskoye deposit

For citation: Kovalev A.A., Karpov V.A., Makarov V.A., Padalko N.L. Using isotope-geochemical criteria for Olympiadinskoye gold deposit gas system genesis diagnosis. *Nauki o Zemle i nedropol'zovanie = Earth sciences and subsoil use*. 2024;47(1):17-34. (In Russ.). <https://doi.org/10.21285/2686-9993-2024-47-1-17-34>. EDN: MFIMTQ.

Введение

Олимпиадинское месторождение является крупнейшим на территории Енисейского края и одним из самых масштабных золоторудных объектов в России и в мире. Месторождение расположено в пределах Верхне-Енашиминского рудного узла, приуроченного к Каитьбинской литолого-фациальной зоне. Флюидный режим формирования золотоносных зон детально освещен в работах, посвященных определению параметров рудогенеза и характеристике составляющих газо-жидкостных включений, в том числе окклюдированных углеводородных и неуглеводородных соединений в кварце руд и вмещающих пород [1, 2].

На этапе доразведки месторождения при бурении одной из скважин в контуре карьера «Восточный» зафиксирован самопроизвольный перелив промывочной жидкости, сопровождавшийся интенсивным газовыделением. По данным санитарно-промышленной лаборатории горного предприятия, в составе газа определены углеводородные и неуглеводородные компоненты с содержанием пожаро-взрывоопасных соединений, в основном метана, до 9,5–18 % об. [1, 3].

Согласно действующим нормативным документам (Федеральные нормы и правила¹ и др.), с целью прогноза возникновения «внештатных ситуаций» фрагментарный анализ

свободных газов на рудных месторождениях выполнялся и выполняется промышленными газоанализаторами; вместе с тем до настоящего времени комплексных научных исследований современного газового потока на объектах Енисейского края не проводилось.

Целью исследования являлось получение научно-обоснованных данных о генезисе современных проявлений газообразных и парообразных флюидов на Олимпиадинском золоторудном месторождении на основе изучения изотопно-геохимических критериев – качественных параметров, количественных характеристик и изотопных показателей составляющих газовых смесей различных природных сред.

В карьере «Восточный» детально рассмотрены газовые системы: сорбированные минеральной частью отложений кординской свиты (R_{1kd}); растворенные в природных (подземных) водах; свободно выделяющиеся из буровзрывных скважин; приземной атмосферы. Изучен остаточный нефте-, газогенерационный потенциал органического вещества вскрытых отложений.

Материалы и методы исследования

При изучении современных газовых систем природных объектов Олимпиадинско-

¹ Федеральные нормы и правила в области промышленной безопасности «Правила безопасности при ведении горных работ и переработке твердых полезных ископаемых» // Docs.cntd.ru. Режим доступа: <https://docs.cntd.ru/document/573156117> (дата обращения: 26.02.2024).



го золоторудного месторождения применен комплекс методов, разработанный на основе опыта и наработок при исследовании природных газов рудных месторождений [4, 5], а также методических подходов к разностадийным геохимическим поискам нефти и газа². Научно-исследовательская работа включала определение качественного состава и количественных характеристик свободных, растворенных в водах и сорбированных породой газовых систем, изотопного состава углерода углекислого газа и метана, пиролитических характеристик органического вещества пород в варианте Rock-Eval [6].

Газо-геохимическая съемка приземной атмосферы экологически «чистого» полигона. Для получения данных о нормальном газо-геохимическом поле вариациям в пространстве количественных показателей и компонентном составе воздушных газовых систем района исследований проведена атмогеохимическая съемка [7] на эталонном полигоне с минимальным влиянием, по розам ветров, техногенных факторов (рис. 1).

Исследования проводились в летний и зимний периоды на пятикилометровом участке, расположенном в горно-таежной местности, на значительном удалении от основных техногенных объектов – золоторудных месторождений Олимпиадинское, Благодатное и Эльдorado.

В карьере «Восточный» выполнено газо-керновое опробование пород раннерифейских отложений кординской свиты (R₁kd) и водногазовое флюидов буровзрывных, наблюдательных и дренажных гидрогеологических скважин. Изучены свободные газы, спонтанно выделявшиеся из буровзрывных скважин и содержащиеся в воздухе рабочей зоны горного сооружения.

Газо-керновое опробование. Для анализа газов, сорбированных породами, в контуре карьера Восточный отобран керн по разрезу разведочной скважины в интервале 0,3–370 м с шагом 10–30 м, который уменьшался до 2–3 м при наличии трещиноватости пород, обуславливающей повышенные фильтрационно-емкостные параметры керна, а также при смене литологического состава отложений.

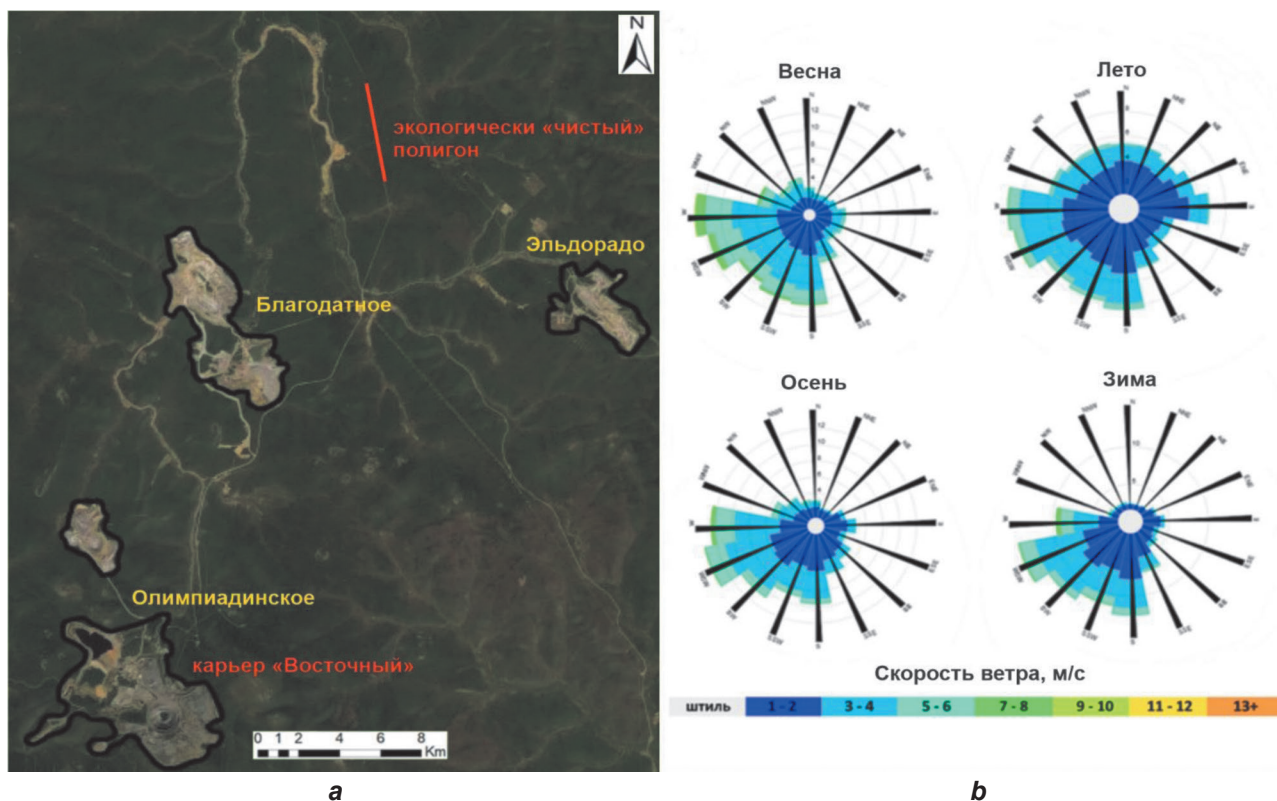


Рис. 1. Схема расположения экологически «чистого» полигона (а) и сезонные розы ветров Северо-Енисейского района (по данным Красгидромета) (б)

Fig. 1. The layout of the "environmentally-friendly" testing area (a) and seasonal wind roses of the Severo-Yeniseysky District (according to Krashydromet data) (b)

² Зорькин Л.М., Лопатин Н.В., Барташевич О.В. Методические рекомендации по геохимическим методам поисков месторождений нефти и газа. М.: Изд-во отдела научно-технической информации ВНИИЯГГ, 1975. 285 с.



Отбор вод с целью изучения растворенных газов. Для решения вопроса о вкладе водорастворенных газов в общий газовый баланс нижних слоев приземной атмосферы предусматривалось исследование вод из буровзрывных (шаг 10–20 м), дренажных и мониторинговых гидрогеологических скважин (отбор из приустьевых частей).

Десорбция предварительно герметизированных образцов керна и природных (подземных) вод проводилась методом термовакуумной дегазации в полевой лаборатории на приборе ПДП-М, согласно методическим рекомендациям [7].

Отбор газовых смесей свободного выделения из буровзрывных скважин. Исследования газовых систем, спонтанно выделяющихся из пород и вод буровзрывных скважин глубоких горизонтов карьера «Восточный», выполнялись согласно разработанной авторами методике с герметизацией устьев скважин паккерами (рис. 2). В зависимости от конкретной горно-геологической обстановки, шаг опробования между скважинами изменялся от 5 до 25 м, а расстояние между профилями составляло около 30 м.

Исследования приземной атмосферы в карьере «Восточный». Основная цель данных работ – изучение пространственно-временных вариаций качественного состава и объемных характеристик составляющих газовых полей в рабочей зоне карьера в зависимости от климатических и конкретных горно-геологических

условий. Отбор проб воздуха эксплуатационных горизонтов карьера осуществлен аналогично опробованию приземной атмосферы на экологически «чистом» полигоне. При газовой съемке в каждый из сезонов (зима, лето) отбирались газы вдоль кольцевых участков бермы, с шагом от 70 до 130 м.

Газохроматографические исследования. Комплекс химико-аналитических работ выполнен в аккредитованной международной Ассоциации аналитических центров «Аналитика» (№ AAC.A.00067) химико-аналитической лаборатории ООО «Центр геотехнологических исследований «Прогноз»» (г. Красноярск). Газовые системы анализировались в соответствии с аттестованной методикой³ на программно-аналитическом комплексе «Кристалл – Хроматек-5000.2» с пламенно-ионизационным детектором и двумя детекторами по теплопроводности с пределами измерений от $n \cdot 10^{-6}$ до 98 % об.

Исследования изотопного состава углерода метана и углекислого газа. Измерения изотопного состава углерода выполнены в лаборатории изотопных методов Томского филиала АО «Сибирский научно-исследовательский институт геологии, геофизики и минерального сырья», аккредитованного в национальной системе аккредитации (№ RA.RU.517930) по аттестованной методике⁴ на масс-спектрометре DELTA V ADVANTAGE фирмы Thermo Finnigan (Германия). В качестве эталонов использованы стан-



а
б
Рис. 2. Газовый пробоотборник в комплекте с пакером (а)
и установка пакера в ствол буровзрывной скважины (б)

Fig. 2. Gas sampler with a packer (a) and installation of the packer in the blasthole (b)

³ Методика выполнения измерений объемной доли углеводородных (C1-C6) и неуглеводородных (кислород, азот, водород, диоксид углерода, гелий) компонентов в приземной атмосфере и в природных газовых системах, извлеченных из горных пород и вод при геологоразведочных работах (ГРП) на нефть и газ. МВИ № СПЭК-01-2009/ЭТ-ГХ-01-09: ФР.1.31.2017.27366. Красноярск, 2009.

⁴ Методика выполнения измерений смещения изотопного состава углерода в пробах природных газов методом масс-спектрометрии: ФР.1.31.2010.07129. СПб., 2010.



дарты Международного агентства по атомной энергии и аттестованные образцы сравнения по углероду. Полученные значения изотопного состава углерода ($\delta^{13}\text{C}$) приведены относительно международного стандарта VPDB, представляющего собой карбонат кальция белемнита позднемелового возраста из формации Пи-Ди (Южная Каролина). Погрешность изотопных анализов с учетом химической подготовки не превышала $\pm 0,5 \text{ ‰}$.

Пиролитические исследования пород. Работы с целью изучения остаточного газо-генерационного потенциала органического вещества вмещающих пород осуществлены в лаборатории геохимии нефти и газа Института нефтегазовой геологии и геофизики им. А.А. Трофимука (Институт нефтегазовой геологии и геофизики СО РАН) на пироллизаторе Source Rock Analyzer в варианте Rock-Eval [6].

Результаты исследования и их обсуждение

Газогеохимические и изотопные характеристики изученных газовых систем приземной атмосферы эталонного полигона и различных сред в карьере «Восточный» приведены в табл. 1.

Как видно из таблицы, для большей части изученных газовых систем Каитыбинской литолого-фациальной зоны характерен углекислотно-кислородно-азотный состав. Исключением является часть газов, полученных при самодегазации буровзрывных скважин и водорастворенных газов, извлеченных методом термовакuumной дегазации, с метан-кислородно-азотным составом.

Экологически «чистый» полигон. На эталонном участке (полигоне) опробование выполнено в летний и зимний периоды. Всего исследовано 109 проб воздушных газовых систем.

Основными неуглеводородными компонентами приземной атмосферы эталонного полигона являются: азот, кислород, углекислый газ, водород и гелий. Объемные значения кислорода, азота и гелия характеризуются низкой вариабельностью, а их среднестатистические показатели, близки к кларковому содержанию данных компонентов в атмосферном воздухе (см. табл. 1). Вместе с тем средние содержания углекислого газа и водорода приземной атмосферы кратно превышают справочные значения и варьируют от летнего сезона к зимнему от 0,27 до 0,37 % об. и от 0,06 до 0,014 % об. соответственно.

В летний сезон углеводородная часть газовых систем состоит из метана и его высокомолекулярных соединений до iC_4H_{10} включительно, а в зимний период состав обогащается *n*-бутаном (C_4H_{10}), бутиленом (C_4H_8), пентаном нормальной (C_5H_{12}) и изомерных (iC_5H_{12}) форм. При этом вне зависимости от сезона опробования средние содержание метана меняется незначительно (% об.): 0,21 (зима) – 0,23 (лето) и близко к его значению в приповерхностном слое атмосферы (0,2 % об.) согласно источнику [9].

Отмечается [12] положительная корреляция между группой составляющих «метан – высокомолекулярные углеводороды – водород» при исчезновении взаимосвязи последних с CO_2 в зимний период (табл. 2).

Учитывая сложное геолого-тектоническое строение эталонного экологически «чистого» полигона, обусловленное наличием разветвленной сети дизъюнктивных нарушений, полученные результаты можно объяснить вкладом в приповерхностную атмосферу газов глубинного генезиса.

И.С. Старобинцем [13] установлено, что парообразные углеводороды не образуются в зоне гипергенеза, а приурочены главным образом к термokatалитической зоне генерации углеводородов; мигрируют только в ретроградном состоянии и из-за размеров своих молекул, практически не сорбируются минеральной частью пород, нерастворимы в водах, плохо растворяются в нефтях. Присутствие данных углеводородов (nC_5H_{12} и iC_5H_{12}) в приповерхностной атмосфере эталонного участка однозначно свидетельствует о процессах диссипации из пород и вод.

Для подтверждения вышеприведенных выводов измерен изотопный состав углерода CO_2 приземной атмосферы в зимний и летний периоды в количестве 19 проб (рис. 3).

Как следует из рисунка, CO_2 обогащен тяжелым изотопом углерода, диапазон $\delta^{13}\text{C}$ варьируется от -3,1 до -9,1 и свидетельствует об их преимущественно глубинном (магматогенном и/или метаморфогенном) генезисе [8, 14–16 и др.].

При прочих равных геологических условиях полученные данные свидетельствуют, что качественные и количественные критерии компонентного состава приземной атмосферы экологически «чистого» полигона обязаны своим формированием двум основным факторам: конкретным ландшафтными и



Таблица 1. Показатели индивидуальных составляющих и групп компонентов газовых систем объектов исследований Енисейского края и Юрубчено-Тохомской зоны нефтегазоаккумуляции
Table 1. Characteristics of gas systems individual components and group of components in the objects of research (Yenisei ridge and the Yurubchen-Tokhomsky oil and gas accumulation zone)

Район	Объект исследования	Диапазон значений объемного содержания газов, средние значения								Диапазон значений d ¹³ C d ¹³ C _{ср} , ‰	
		n·10 ⁻³ % об.		% об.							
Справочные параметры атмосферного воздуха ⁵		CH ₄	ΣC ₂ -C ₆	H ₂	O ₂	N ₂	CO ₂	He	CH ₄	CO ₂	
		0,2 [8]	–	0,00005	20,95	78,09	0,03	0,0005	Не опр.	-7 [9]	
		Летний период опробования									
		0,2–0,24 0,21	0,002–0,02* 0,009*	0,006–0,028 0,06	20,43–20,99 20,9	77,63–78,74 78,2	0,16–0,37 0,3	0,0005	Не опр.	-6,8...-3,1 -4,9	
		Зимний период опробования									
Енисейский край (Каитъбинская литолого- фациальная зона)	1, а. Приземная атмосфера эталонного полигона	0,209–0,457 0,23	0,006–0,157** 0,022**	0,001–0,131 0,014	20,34–21,16 20,7	77,71–79,04 78,4	0,15–0,7 0,4	0,0005	Не опр.	-9,1...-5,7 -7,5	
		3,4–9,43 6,41	0,042–0,04** 0,041**	0,035–0,028 0,031	4,3–4,1 4,2	84,6–84,5 84,6	10,4–10,6 10,5	0,0004	Не опр.	-25,3	
		2,52–328,4 57,88	0,161–53,443 7,81	0,001–0,007 0,003	5,15–20,91 19,6	77,11–93,83 79,1	0,11–0,91 0,4	0,0005–0,0024 0,001	Не опр.	-15,8...-6,2 -8,8	
Енисейский край (Каитъбинская литолого- фациальная зона, Олимпиадинское золоторудное месторождение, карьер «Восточный»)	3, а. Газовые системы вод из буровзрывных скважин	0,35–2250 58,49	0,007–77,68 2,368	0,001–0,378 0,014	1,88–21,45 19,18	74,31–94,42 79,15	0,17–5,05 1,22	0,0004–0,022 0,0008	-41,2...-39 -40,1	-39,9...-8,4 -17,6	
		0,23–25,95 3,26	0,013–0,905 0,114	0,002–0,121 0,013	17,83–21,23 20,56	72,3–80,64 77,93	0,1–8,57 1,03	0,0004–0,0007 0,0004	Не опр.	-30,9...-12,2 -19,8	
	4. Газовые системы свободного выделения из буровзрывных скважин	Зимний период опробования									
		2,2–1417 337,57	0,292–678,034 23,437	0,001–0,073 0,005	14,35–20,98 20,76	67,37–78,83 77,67	0,11–0,84 0,31	0,0002–0,3632 0,0057	-40,1...-32 -36	-19,9...-10,4 -14,5	

⁵ Войткевич Г.В., Мирошников А.Е., Поваренных А.С., Прохоров В.Г. Краткий справочник по геохимии. М.: Недра, 1977. 96 с.



Район	Объект исследования	Диапазон значений объемного содержания газов, средние значения										Диапазон значений $\delta^{13}\text{C}$ $\delta^{13}\text{C}_{\text{ср.1}} \text{ ‰}$			
		$n \cdot 10^{-3} \text{ ‰ об.}$					% об.								
		CH ₄	ΣC ₂ -C ₆	H ₂	O ₂	N ₂	CO ₂	He	CH ₄	CO ₂	He				
Справочные параметры атмосферного воздуха ⁵		0,2 [8]	–	0,00005	20,95	78,09	0,03	0,0005	He опр.						
		Летний период опробования													
		0,20–0,27 0,218	0,003–0,044* 0,016**	0,001–0,002 0,001	20,57–21,45 20,96	76,83–78,79 77,9	0,07–1,5 0,6	0,0005	He опр.						
		Зимний период опробования													
		0,156–0,56 0,235	0,004–0,069* 0,02**	0,001–0,08 0,011	20,39–21,3 20,88	77,65–78,92 78,23	0,11–0,7 0,32	0,0005	He опр.						
Енисейский край (Кайтабынская литолого-фациальная зона, Олимпиадинское золоторудное месторождение, карьер «Восточный»)	5. Приземная атмосфера карьера «Восточный»	0,2–28,84 4,34	0,006–0,633 0,066	He обн.	20,44–20,98 20,78	77,18–78,79 77,98	0,07–1,02 0,36	0,0005	He опр.						
		48320	0,15*	He опр.	He опр.	53,8	2,2	0,0008	-55,7			He опр.			
		74270	12050	He опр.	He опр.	13,4	0,35	He опр.	-42,5; -42,7			He опр.			
		78950	18830	0,265	1,1	16,9	0,32	0,34	-38,3					-9,8	
		65540	6870	He опр.	He опр.	28	0,4	He опр.	-49			He опр.			
Юрубчено-Тохомская зона нефтегазо-накопления	Поверхностные газопрооявления [12]	80750	7750	He опр.	He опр.	11,3	0,1	He опр.	-38,5			He опр.			
		Водорастворенные газы из глубокой скважины (Eos) [13–14]													
		Растворенные в нефти газы из глубокой скважины (R) [13–14]													

Примечание. Не опр. – параметр (компонент) не определялся; не обн. – компонент не обнаружен; * – $\Sigma \text{C}_2\text{-C}_4$; ** – $\Sigma \text{C}_2\text{-C}_6$; количественные показатели компонентов газовых систем из скважин, опробованных в пределах Юрубчено-Тохомской зоны нефтегазо-накопления, взяты из каталога пластовых флюидов⁶.

⁶ Правоторов С.Б., Жуковин Ю.А., Зоценко Н.А., Битнер А.К., Битнер Н.Я., Каминская О.С. [и др.]. Каталог пластовых флюидов запада Сибирской платформы и ее обрамлений (по состоянию на 01.12.87 г.). Красноярск: Изд-во ПГО «Енисейнефтегазгеология», 1988. 171 с.



Таблица 2. Корреляционная матрица компонентов приземной атмосферы экологически «чистого» полигона (лето, зима)
Table 2. Correlation matrix of the surface atmosphere components of the “environmentally-friendly” site (summer, winter)

Летний период						
	CH ₄	ΣC ₂ -C ₄	H ₂	O ₂	N ₂	CO ₂
CH ₄	1					
ΣC ₂ -C ₄	0,96	1				
H ₂	0,73	0,78	1			
O ₂	0,26	0,24	0,15	1		
N ₂	-0,14	-0,21	-0,34	-0,34	1	
CO ₂	0,4	0,44	0,59	0,17	-0,42	1
Зимний период						
	CH ₄	ΣC ₂ -C ₅	H ₂	O ₂	N ₂	CO ₂
CH ₄	1					
ΣC ₂ -C ₅	0,98	1				
H ₂	0,93	0,92	1			
O ₂	-0,15	-0,17	-0,29	1		
N ₂	-0,13	-0,13	0,01	-0,58	1	
CO ₂	-0,14	-0,09	-0,06	-0,4	0,06	1

Примечание. Курсивом отмечены коэффициенты корреляции со значениями > 0,4 (по модулю).

геоморфологическим условиям и сложному геолого-тектоническому строению, наличию разветвленной сети дизъюнктивных нарушений способствующих процессам диффузионно-фильтрационного массопереноса флюидальных систем из глубоких горизонтов.

Карьер «Восточный». В карьере выполнено газокерновое и водногазовое опробование: пород, вод буровзрывных, наблюдательных и дренажных гидрогеологических скважин, а также изучены свободные газы, спонтанно выделяющиеся из буровзрывных скважин и содержащиеся в воздухе рабочей зоны горного сооружения.

Газовые системы, сорбированные породой. При бурении одной из разведочных скважин вскрыты породы кординской свиты

нижнего рифея (R₁kd), представленные тремя чередующимися литологическими разностями (пачками): 1 – кварц-сланцевые сланцы; 2 – кварц-карбонатные сланцы; 3 – черные углеродистые сланцы. Основная часть разреза сложена литифицированными и метаморфизованными осадками углеродистых сланцев.

В десорбированных из пород газах определены содержания углеводородной и неуглеводородной компонент газовой системы (100 исследований) и изотопный состав углерода CO₂ (22 анализа).

Исследованы флюидные компоненты открытых (полуоткрытых) пор и трещин керна пород. Особенностью состава сорбированных газов являлось присутствие в отдельных интервалах разреза экстремальных содержаний

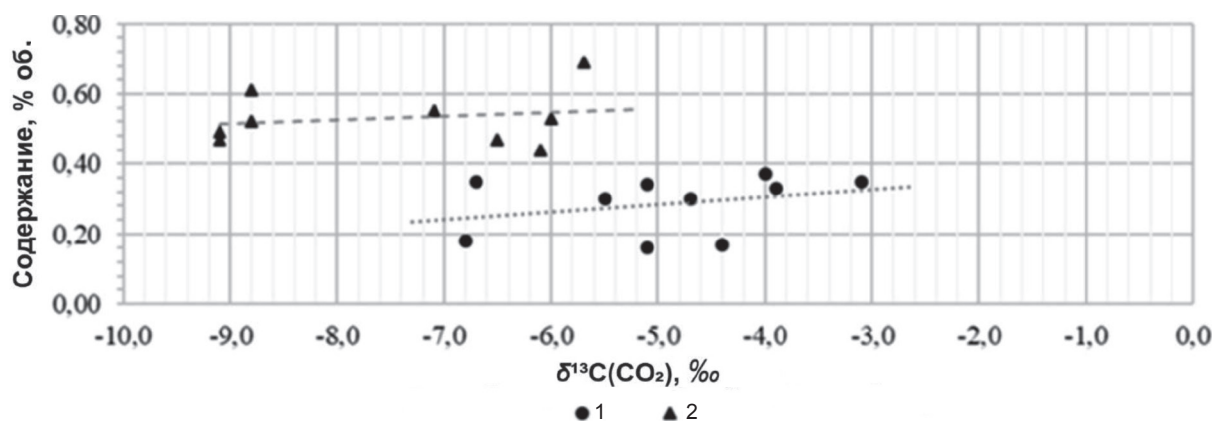


Рис. 3. Значения $\delta^{13}\text{C CO}_2$ приземной атмосферы экологически «чистого» полигона:
1 – летний период; 2 – зимний период

Fig. 3. Values of $\delta^{13}\text{C CO}_2$ of the surface atmosphere of the “environmentally-friendly” site:
1 – summer period; 2 – winter period



кислорода (5,15 % об.) и азота (93,83 % об.), характерных для «мертвого воздуха» [17]. Углеводородная составляющая представлена: метаном, газообразными и парообразными его гомологами (ΣC_1-C_6), включая изомерные и непредельные углеводородные соединения: этилен, пропилен и бутилен.

Посредством корреляционного анализа [12] установлена значимая связь между: гелием и метаном, парообразными и газообразными углеводородами, гелием и парообразными соединениями; азотом и парообразными гомологами метана; слабая корреляционная зависимость существует между гелием и азотом; выявлена отрицательная корреляция между кислородом и: парообразными углеводородами, азотом, гелием (табл. 3).

По данным изотопных исследований углеводород углекислого газа имеет значительные вариации количественных показателей и $\delta^{13}C$ от -6,2 до -15,8 ‰ (рис. 4).

До 90 % проб выборки имеют узкий диапазон значений $\delta^{13}C$ от -12,2 до -15,8 ‰, однако разброс данных $\delta^{13}C$, практически в 10 ‰, свидетельствует о разных источниках, участвующих в формировании данных газовых систем.

Согласно изотопным критериям диагностики генезиса газов [8, 14–16], а также наличию парообразных углеводородов (C_5-C_6) с незначительными сорбционными и высокими диффузионно-фильтрационными свойствами [13], можно констатировать, что в формировании состава газовых систем отложений принимают участие в основном термокаталитические и глубинные флюиды с низкой долей газов приземной атмосферы.

Газовые системы природных (подземных) вод. В пределах Олимпиадинского месторождения распространение подземных вод контролируется водоносными зонами открытой трещиноватости, формирующими безнапорные, пресные, гидрокарбонатные, слабо

Таблица 3. Корреляционная матрица компонентов газовых смесей, сорбированных породами
Table 3. Correlation matrix of gas mixture components sorbed by rocks

	CH ₄	ΣC_2-C_4	ΣC_5-C_6	H ₂	O ₂	N ₂	CO ₂	He
CH ₄	1							
ΣC_2-C_4	0,73	1						
ΣC_5-C_6	0,4	0,4	1					
H ₂	-0,15	-0,08	0	1				
O ₂	-0,15	-0,24	-0,62	0,12	1			
N ₂	0,15	0,24	0,63	-0,1	-0,99	1		
CO ₂	-0,22	-0,27	-0,33	-0,26	0,15	-0,23	1	
He	0,81	0,58	0,55	-0,16	-0,43	0,44	-0,36	1

Примечание. Курсивом отмечены коэффициенты корреляции со значениями > 0,4 (по модулю).

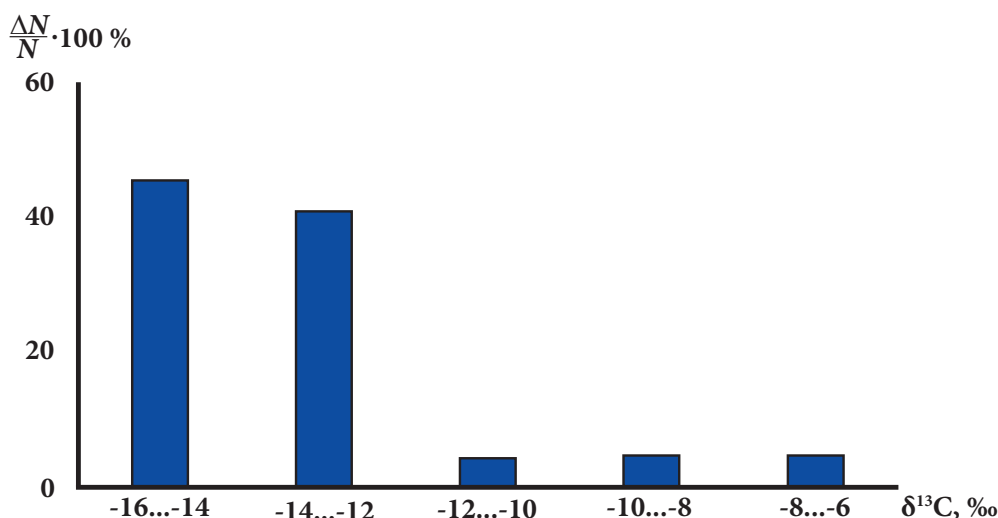


Рис. 4. Вариации изотопного состава углерода CO₂, десорбированного из керна разведочной скважины
Fig. 4. Variations in the isotopic composition of carbon CO₂ desorbed from the exploration well core



Таблица 4. Корреляционная матрица компонентов водорастворенных газовых систем карьера «Восточный»

Table 4. Correlation matrix of water dissolved gas system components of the Vostochny open-pit mine

	CH ₄	ΣC ₂ -C ₄	ΣC ₅ -C ₆	H ₂	O ₂	N ₂	CO ₂	He
CH ₄	1							
ΣC ₂ -C ₄	0,87	1						
ΣC ₅ -C ₆	0,06	0,08	1					
H ₂	-0,04	-0,05	-0,01	1				
O ₂	-0,21	-0,29	-0,22	-0,06	1			
N ₂	0,13	0,22	0,2	0,08	-0,87	1		
CO ₂	-0,05	-0,03	0,08	-0,12	-0,25	-0,08	1	
He	0,96	0,83	0	-0,04	-0,21	0,14	-0,06	1

Примечание. Курсивом отмечены коэффициенты корреляции со значениями > 0,4 (по модулю).

минерализованные воды с преимущественно инфильтрационным питанием [18].

Для исследования водорастворенных газовых систем природных вод буровзрывных, дренажных, наблюдательных скважин карьера «Восточный» выполнены отбор, термовакуумная дегазация и хроматографические исследования 300 проб.

Часть газов характеризуется аномально высокими содержаниями метана (2,25 % об.), азота (94,42 % об.) и низкими – кислорода (1,88 % об.); идентифицированы водород и гелий (см. табл. 1).

Наряду с неуглеводородными компонентами в газовых смесях определены углеводороды от метана до его парообразного гомолога – нормального гексана включительно, а также этан, этилен, пропан, пропилен, бутан, изобутан, бутилен, пентан, изопентан и изомерные соединения гексана (2,2-диметилбутан, 2,3-диметилбутан, 2-метилпентан и 3-метилпентан).

Установлена [12] сильная корреляция между: метаном и его газообразными гомологами; CH₄ и гелием; ΣC₂-C₄ и гелием; отрицательная корреляция между азотом и кислородом (табл. 4).

В представительной выборке водорастворенных газовых смесей определен изотопный состав углерода углекислого газа (46 проб) и метана (2 образца). Согласно исследованиям и теоретическим наработкам [8, 14–16], всю изученную коллекцию можно дифференцировать на три группы.

Первая группа (24 пробы) с низким содержанием CO₂ от 1,13 до 2,18 % об., при среднем значении 1,66 % об., обогащена тяжелым изотопом углерода δ¹³C от -8,4 ‰ до -16,6 ‰ при δ¹³C_{ср.} = -12,8 ‰, что указывает на глубинный источник формирования – термогенные газы, связанные со скоплениями углеводородов.

Подтверждением данного вывода является δ¹³C метана в двух представительных пробах (-39 ‰ и -41,2 ‰), который, согласно диагностической схеме М. Шоэла, характерен для аквигенного органического вещества и соответствует автономным газовым высоко конденсатным углеводородным системам III класса (пентан + высшие – < 3,5 %) [19] (рис. 5).

Согласно данным источников [10–11] (см. табл. 1), полученные характеристики δ¹³C метана близки к значениям δ¹³C CH₄ нефтегазоконденсатных скоплений Юрубчено-Тохомской зоны нефтегазонакопления (δ¹³C_{ср.} от -38,3 до -49 ‰) и не характерны для газов верхней газогенерирующей (био)зоны (δ¹³C_{ср.} = -55,7 ‰).

Вторая группа (15 проб) имеет более широкий диапазон содержания CO₂ от 1,3 до 8,57 % об. при среднестатистическом показателе 3,5 % об. с δ¹³C от -17,9 ‰ до -25,1 ‰ (δ¹³C_{ср.} = -18,5 ‰). Газовые смеси этой группы, по генезису, являются термогенными. В изотопно-легких пробах (δ¹³C < -23 ‰) возможно присутствие небольшой доли (примеси) биохимических (микробиальных) газов; вместе с тем, как определено изотопными исследованиями углерода углекислоты, из зоны разгрузки природных вод на экологически «чистом» полигоне, данная группа может быть обязана своим формированием продуктам преобразования органического вещества почвенно-растительного слоя со значениями δ¹³C = -25,3 ‰ (см. табл. 1).

Третья группа (7 проб) диоксида углерода с содержанием от 1,87 до 4,78 % об. при среднем содержании 3,2 % об. значительно обогащена легким изотопом при широком диапазоне значений δ¹³C от -26,1 ‰ до -39,9 ‰, δ¹³C_{ср.} = -31,5 ‰, что указывает на значительную роль биохимических, микробиальных процессов в формировании этих газов.

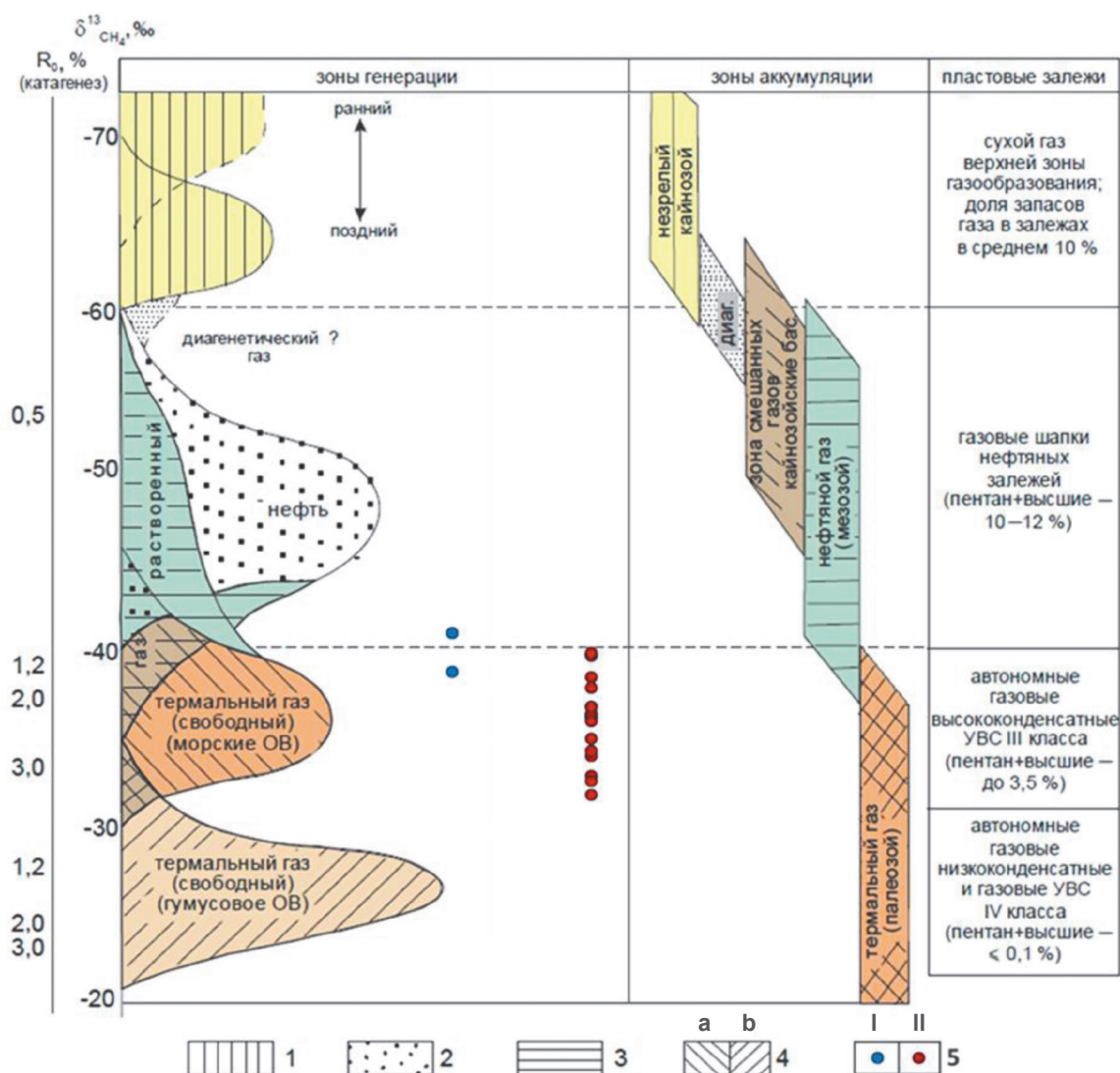


Рис. 5. Принципиальная схема формирования и диагностики газовых углеводородных систем (по источнику [22] с добавлениями авторов):

1 – сухой газ ранней генерации; 2 – нефть; 3 – растворенный газ; 4 – термальный свободный газ: морское органическое вещество (a); гумусовое органическое вещество (b); 5 – $\delta^{13}\text{C}$ метана, растворенного в природных (подземных) водах карьера «Восточный» (I), свободного выделения из буровзрывных скважин (II)

Fig. 5. Schematic diagram of gas hydrocarbon systems formation and diagnosis (according to the source [22] with authors' additions):

1 – dry gas of early generation; 2 – oil; 3 – dissolved gas; 4 – thermal free gas: marine organic substance (a), organic humus (b); 5 – $\delta^{13}\text{C}$ methane dissolved in natural (underground) waters of the Vostochny open-pit mine (I), free release from blastholes (II)

Газовые системы свободного выделения из буровзрывных скважин. Для изучения газов спонтанного выделения из буровзрывных скважин отобрано 206 проб. Установлено, что средние объемные доли азота и кислорода близки к нормальным воздушным содержаниям, а среднестатистические значения CO_2 , H_2 и He превышают таковые (см. табл. 1).

В газовых системах зафиксирован углеводородный ряд от метана до его высококипящего гомолога – нормального гексана включительно. В 100 % исследованных проб метан присутствует в количествах, превышающих

его средневзвешенную объемную долю в приземной атмосфере ($2 \cdot 10^{-4}$ % об.) [9]; вместе с тем наличие газообразных углеводородов и высококипящих соединений с молекулярной массой C_5 и C_6 , учитывая их незначительные сорбционные и высокие диффузионно-фильтрационные свойства [13], еще раз свидетельствует о наличии подтока нафтидов из глубины. Относительное содержание метана в углеводородной части варьируется от 70,1 до 97,1 %, при среднем значении 92,7 % отн., то есть газы из разрезов буровзрывных скважин – «жирные».

**Таблица 5. Корреляционная матрица компонентов газовых смесей спонтанного выделения из буровзрывных скважин****Table 5. Correlation matrix of the components of blasthole spontaneous gas mixtures**

	CH ₄	ΣC ₂ -C ₄	ΣC ₅ -C ₆	H ₂	O ₂	N ₂	CO ₂	He
CH ₄	1							
ΣC ₂ -C ₄	0,89	1						
ΣC ₅ -C ₆	0,72	0,87	1					
H ₂	0,81	0,47	0,21	1				
O ₂	-0,91	-0,68	-0,46	-0,93	1			
N ₂	-0,94	-0,87	-0,71	-0,73	0,79	1		
CO ₂	0,24	0,23	0,16	0,35	-0,24	-0,36	1	
He	0,94	0,73	0,49	0,92	-0,97	-0,86	0,22	1

Примечание. Курсивом отмечены коэффициенты корреляции со значениями > 0,4 (по модулю).

Установлена тесная корреляция [12] между метаном и: его тяжелыми гомологами, водородом; гелием и: CH₄, C₂-C₄, водородом; определена положительная корреляция между O₂ и N₂ (табл. 5). Существует обратная зависимость всех составляющих газовых систем спонтанного выделения за исключением CO₂ с кислородом и азотом, что также указывает на различный генезис этих компонентов.

Для газов спонтанного выделения исследован изотопный состав углерода CO₂ (56 проб) и CH₄ (17 проб).

Для углекислого газа характерен широкий интервал значений δ¹³C: от -9,9 до -28,6 ‰, при среднем значении -13,7 ‰. Согласно изотопным критериям генезиса газов [8, 14–16], выделено четыре группы:

– первая (9 проб) – с вариациями δ¹³C от -9,9 до -10,9 ‰ и δ¹³C_{ср.} = -10,5 ‰, генетически связана с ювенильной двуокисью углерода; источник газов – глубинный, метаморфогенный;

– вторая (15 проб) – δ¹³C = -11,1...-11,9 ‰, δ¹³C_{ср.} = -11,4 ‰, характеризуется значениями близкими для CO₂ приземной атмосферы Сибирской платформы и углекислотой глубинного генезиса;

– третья (30 проб) – с диапазоном δ¹³C = -12,1...-19,9 ‰, средний показатель – δ¹³C = -14,8 ‰; обусловлен влиянием на газовую смесь водо-растворенного органического вещества;

– четвертая (2 пробы) – с параметрами δ¹³C = -25,6 и -28,6 ‰ генетически связана с биохимическим углекислым газом почвенно-растительного слоя.

Двуокись углерода газовых систем буровзрывных скважин главным образом обязана своим генезисом процессам смешивания в различных соотношениях ювенильного угле-

кислого газа, водорастворенной углекислоты, двуокиси углерода нижней зоны каталитической преобразованности органического вещества морского генезиса и атмосферного CO₂.

В представительных пробах газовых систем буровзрывных скважин карьера «Восточный» вариации значений δ¹³C метана от -28,6 до -40,1 ‰ соответствуют изотопным соотношениям водорастворенного метана, характерны для аквагенного органического вещества и присущи газовым высоко конденсатным углеводородным системам скоплений Юрубчено-Тохомской зоны нефтегазоаккумуляции [20] (см. рис. 5, рис. 6).

Газовые системы приземной атмосферы карьера «Восточный». Методом сорбционной хроматографии изучены газообразные и парообразные компоненты приземной атмосферы рабочей зоны карьера «Восточный». В независимости от периода опробования, установлен углекислотно-кислородно-азотный состав образцов приземной атмосферы, являющийся идентичным газовым системам пород и природных вод изученного разреза (см. табл. 1).

Содержания объемной доли азота, кислорода и гелия в воздухе рабочей зоны близки к значениям нормального газо-геохимического поля; от летнего этапа к зимнему отмечается увеличение среднего количественного показателя водорода с превышением нормального фона в 1,4 раза. Обратная зависимость наблюдается для CO₂, значения которого снижаются в зимний период.

В летний сезон опробования в атмосфере карьера, в отличие от полигона, гомологический ряд метана увеличивается до C₅ включительно: идентифицированы *n*-бутан, бутилен, пентан и изо-пентаны. В зимний этап исследований качественный состав газовых систем приземной атмосферы карьера и нормально-

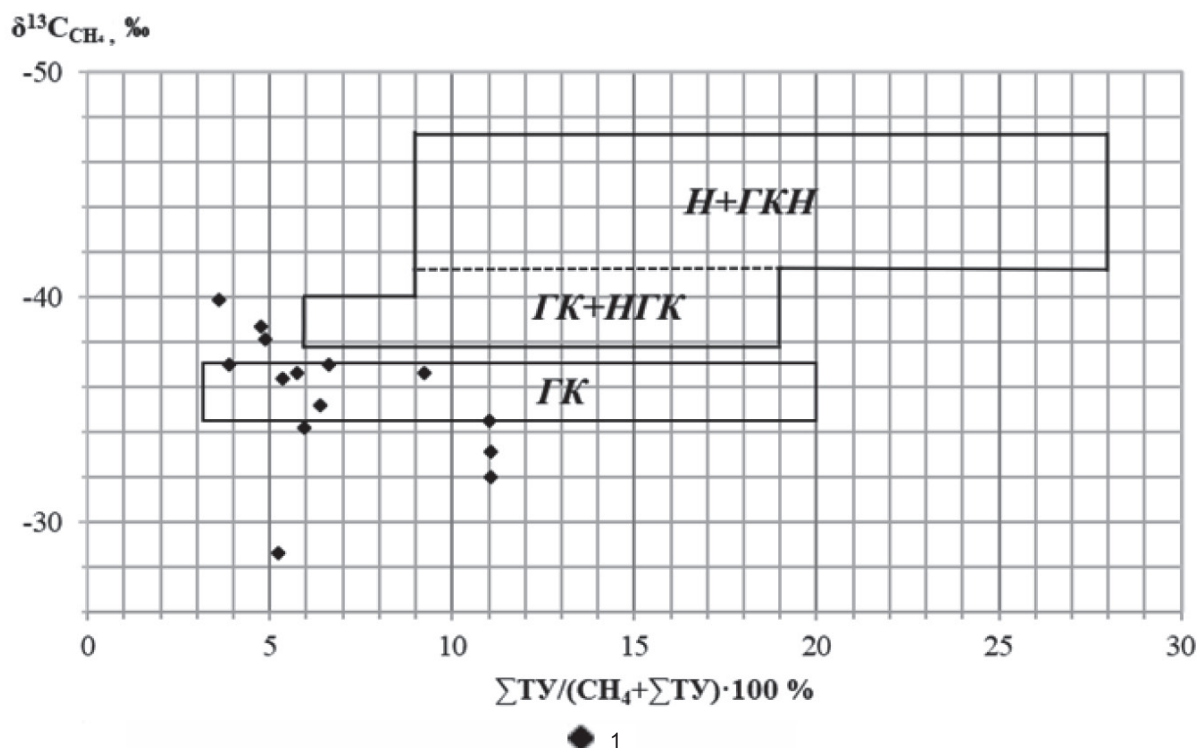


Рис. 6. Изотопно-геохимические показатели газов рифей-нижнекембрийских отложений Юрубчено-Тохомской зоны нефтегазоаккумуляции [20] и Олимпиадинского месторождения:

1 – углеводородные газовые системы Олимпиадинского месторождения

Типы газов: H+ГКН – нефтяные и газоконденсатные; ГК+НГК – вторичные газоконденсатные и нефтегазоконденсатные; ГК – первичные газоконденсатные

Fig. 6. Isotope-geochemical indicators of gases of Riphean-Lower Cambrian deposits from the Yurubcheno-Tokhomskaya oil and gas accumulation zone [20] and Olimpiadinskoye field:

1 – hydrocarbon gas systems of the Olimpiadinskoye field

Types of gases: H+ГКН – oil and gas condensate; ГК+НГК – secondary gas condensate and oil and gas condensate; ГК – primary gas condensate

го газо-геохимического поля Татарско-Аяхтинской литолого-фациальной зоны идентичен. Значение относительной доли тяжелых гомологов метана в составе углеводородной части достигает 16–19 %.

Для летнего периода работ наблюдается сильная положительная корреляция [12] между метаном и его тяжелыми гомологами, а также взаимосвязь каждого из последних с изотопно-тяжелым CO_2 . Определена обратная зависимость углеводородных компонентов с кислородом и азотом, что указывает на наличие существующего газового потока из глубоких горизонтов разреза (табл. 6).

В зимний этап исследований выявлены значимые корреляционные связи между: углеводородными составляющими; водородом и тяжелыми гомологами метана; установлена слабая зависимость H_2 с эндогенным CO_2 , последнее свидетельствует как о глубинном генезисе водорода, так и возможном образовании водорода вследствие химических реакций.

Для диагностики источников формирования газовых систем рабочей зоны карьера наряду с анализом их качественных показателей, количественных характеристик, корреляционных соотношений использовались результаты исследований смещения изотопного состава углерода CO_2 (рис. 7).

Как в летний, так и в зимний период для углекислого газа характерен тяжелый изотопный состав – $\delta^{13}\text{C}_{\text{ср.}} = -8,2; -7,2 \text{ ‰}$ соответственно, связанный с преобладанием во флюиде преимущественно глубинной двуокиси углерода.

Результаты пиролитических исследований. Для оценки остаточного нефтегазогенерационного потенциала органического вещества рифейской толщи на Олимпиадинском месторождении в карьере «Восточный» выполнены пиролитические исследования 27 образцов различных литологических разностей пород. Результаты представлены в табл. 7.

В соответствии с классификацией нефтегазоматеринских пород Тиссо, Вельте [21] и



Табл. 6. Корреляционная матрица составляющих воздуха приземной атмосферы карьера «Восточный» в разные периоды опробования

Table 6. Correlation matrix of the surface atmosphere air components in the Vostochny open-pit mine in different periods of testing

Летний период						
	CH ₄	ΣC ₂ -C ₅	H ₂	O ₂	N ₂	CO ₂
CH ₄	1					
ΣC ₂ -C ₅	0,69	1				
H ₂	0,08	-0,03	1			
O ₂	-0,39	-0,47	0,14	1		
N ₂	-0,41	-0,64	0,19	0,20	1	
CO ₂	0,54	0,84	-0,12	-0,46	-0,76	1
Зимний период						
	CH ₄	ΣC ₂ -C ₅	H ₂	O ₂	N ₂	CO ₂
CH ₄	1					
ΣC ₂ -C ₅	0,62	1				
H ₂	0,16	0,53	1			
O ₂	0,21	0,2	-0,02	1		
N ₂	-0,17	-0,24	-0,32	-0,37	1	
CO ₂	0,09	0,26	0,42	-0,01	-0,18	1

Примечание. Курсивом отмечены коэффициенты корреляции со значениями > 0,4 (по модулю).

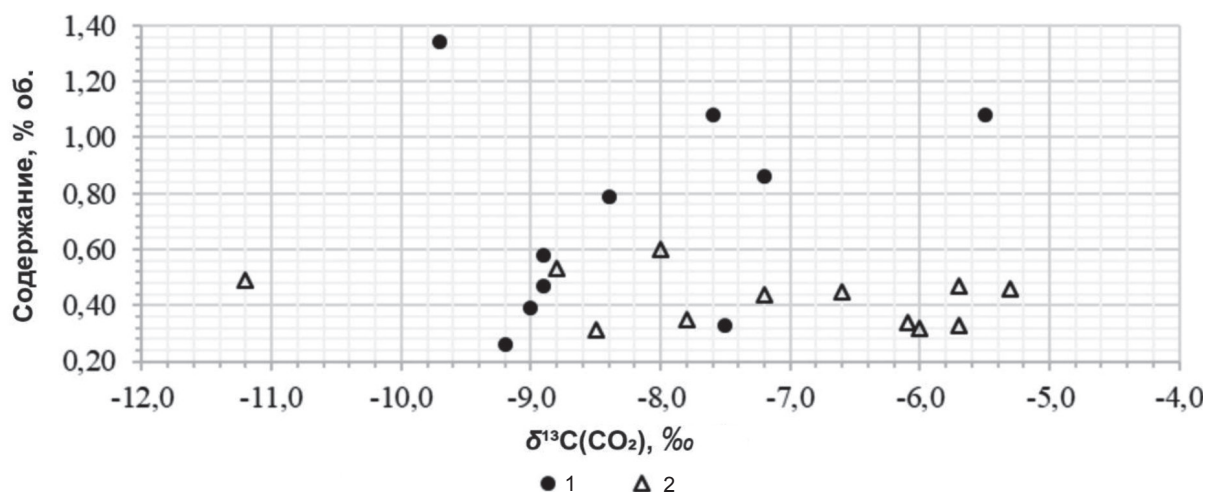


Рис. 7. Значения $\delta^{13}\text{C CO}_2$ приземной атмосферы рабочей зоны карьера «Восточный»:

1 – летний период; 2 – зимний период

Fig. 7. Values of $\delta^{13}\text{C CO}_2$ of the surface atmosphere of the working zone of the Vostochny open-pit mine:

1 – summer period; 2 – winter period

Таблица 7. Основные пиролитические параметры органического вещества горных пород разреза карьера «Восточный»

Table 7. Main pyrolytic parameters of the rock organic substance in the Vostochny open-pit mine

Показатель	S_1 , мг УВ/г породы	S_2 , мг УВ/г породы	$PI = S_1/(S_1 + S_2)$	S_3 , мг CO_2 /г породы	TOC , % на породу	$HI = S_2 \cdot 100/TOC$, мг УВ/г $C_{орг.}$	$OI = S_3 \cdot 100/TOC$, мг CO_2 /г $C_{орг.}$
$X_{мин}$	0	0	0	0,16	0,04	0	36
$X_{макс}$	0,06	0,08	1	0,29	0,54	113	630
$X_{ср}$	0,01	0,02	0,29	0,22	0,24	16	142,4

Примечание. S_1 – количество свободных углеводородов, присутствующих в образце и выделившихся при $T = 300^\circ\text{C}$, мг/г породы; S_2 – количество тяжелых нефтяных углеводородов и углеводородов крекинга органического вещества или органических соединений, выделившихся в интервале температур $300\text{--}600^\circ\text{C}$, мг УВ/г породы; S_3 – количество CO_2 , выделившееся в ходе пиролиза при температурах до 400°C ; PI – степень выработанности керогена; TOC – суммарное содержание органического углерода в образце (породе), % масс.; HI – водородный индекс мг УВ/г TOC , показывает наличие водородных структур в молекуле органических соединений, для пород используется в качестве характеристики литолого-фациальных особенностей и типа органического вещества; OI – индекс кислорода, мг CO_2 /г TOC , показывает наличие кислородных структур в молекуле органических соединений, для пород используется как характеристика степени преобразования органического вещества.



Петерса [22] установлено, что остаточное органическое вещество изученных литифицированных и метаморфизованных осадков исчерпало свой нефтегазогенерационный потенциал и не может служить источником формирования аномальных полей концентраций Олимпиадинского месторождения. Идентифицированные в зоне поисково-геохимического зондирования газовые системы являются аллохтонными по отношению к вмещающим отложениям кординской свиты нижнего рифея.

Заключение

По материалам изотопно-геохимических исследований авторами получены научно-обоснованные данные о генезисе современных проявлений газообразных и парообразных флюидов на Олимпиадинском золоторудном месторождении.

На основании результатов, изложенных в настоящей работе, можно сделать выводы:

– нормальное газовое поле приземной атмосферы экологически «чистого» полигона обязано своим формированием конкретным ландшафтным и геоморфологическим услови-

ям района исследований, а также флюидальным системам глубоких горизонтов, которые в результате наличия разветвленной сети дизъюнктивных нарушений и диффузионно-фильтрационным процессам массопереноса достигли зоны поискового зондирования;

– на Олимпиадинском месторождении органическое вещество рудовмещающих черносланцевых отложений кординской свиты исчерпало нефтегазогенерационный потенциал и не принимает участия в формировании современного газового потока;

– доминирующий вклад в становление полей концентраций газообразных и парообразных углеводородных и неуглеводородных флюидов природных сред Олимпиадинского золоторудного месторождения вносят аллохтонные по отношению к вмещающим породам (R_1kd) эндогенные и нефтидогенные системы, без участия газов верхней газогенерирующей (био)зоны;

– по изотопно-геохимическим критериям газовые системы Олимпиадинского месторождения идентичны газоконденсатным скоплениям Юрубчено-Тохомской зоны нефтегазонакопления.

Список источников

1. Сазонов А.М., Звягина Е.А., Сильянов С.А., Лобанов К.В., Леонтьев С.И., Калинин Ю.А. [и др.]. Рудогенез месторождения золота Олимпиада (Енисейский край, Россия) // Геосферные исследования. 2019. № 1. С. 17–43. <https://doi.org/10.17223/25421379/9/2>. EDN: WLSEZA.
2. Гибшер Н.А., Томиленко А.А., Сазонов А.М., Бульбак Т.А., Рябуха М.А., Сильянов С.А. [и др.]. Олимпиадинское золоторудное месторождение (Енисейский край): температура, давление, состав рудообразующих флюидов, $\delta^{34}S$ сульфидов, $^3He/^4He$ флюидов, Ar-Ar возраст и продолжительность формирования // Геология и геофизика. 2019. Т. 60. № 9. С. 1310–1329. <https://doi.org/10.15372/GiG2019073>. EDN: ТРҮКРҮ.
3. Петрова М.А., Шапаренко Е.О., Хоменко М.О. Метан-азот-углекислотный состав газовой фазы флюидных включений в кварце с глубоких горизонтов месторождения Олимпиада по данным рамановской спектроскопии // Геология: материалы 58-й Междунар. науч.-студ. конф. (г. Новосибирск, 10–13 апреля 2020 г.). Новосибирск, 2020. С. 81. EDN: GQUIKF.
4. Фридман А.И. Природные газы рудных месторождений. М.: Недра, 1970. 192 с.
5. Матвиенко Н.Г. Выделение природных газов при освоении рудных месторождений. М.: Недра, 1988. 229 с.
6. Behar F., Beaumont V., Penteado H.L.D.B. Rock-Eval 6 technology: performances and developments // Oil & Gas Science and Technology. 2001. Vol. 56. Iss. 2. P. 111–134. <http://doi.org/10.2516/ogst:2001013>.
7. Старобинец И.С., Калинин М.К. Отбор проб и анализ природных газов нефтегазоносных бассейнов. М.: Недра, 1985. 239 с.
8. Галимов Э.М. Изотопы углерода в нефтегазовой геологии: монография. М.: Недра, 1973. 379 с.
9. Кузовкин В.В., Семенов С.М. Метан в приповерхностном слое атмосферы: современное содержание, многолетние тренды и внутригодовая изменчивость // Фундаментальная и прикладная климатология. 2020. Т. 3. С. 5–21. <https://doi.org/10.21513/2410-8758-2020-3-05-21>. EDN: LLQIDM.
10. Рытькова Е.И., Якунина И.И., Блохина Г.Г. Изотопный состав углерода метана поверхностных газопоявлений // Изотопные и битуминологические методы при поисках нефти и газа: сб. науч. тр. / под ред. Л.М. Зорькина. М.: Изд-во ВНИИгеоинформсистем, 1988. С. 42–49.
11. Дахнова М.В., Баженова Т.К., Лебедев В.С., Киселев С.М. Изотопные критерии прогноза фазового состава углеводородов в рифейских и венд-кембрийских отложениях Лено-Тунгусской нефтегазоносной провинции // Геология и геофизика. 2011. Т. 52. № 8. С. 1199–1209. EDN: NYJKNF.
12. Дэвис Дж.С. Статистический анализ в геологии. Кн. 1. / пер. с англ. М.: Недра, 1990. 319 с.
13. Старобинец И.С. Газогеохимические показатели нефтегазоносности и прогноз состава углеводородных скоплений. М.: Недра, 1986. 198 с.



14. Шакиров Р.Б. Газогеохимические поля окраинных морей Восточной Азии: монография. М.: ГЕОС, 2018. 341 с. EDN: XXTSYR.
15. Алексеев Ф.А., Войтов Г.И., Лебедев В.С., Несмелова З.Н. Метан. М.: Недра, 1978. 310 с.
16. Голышев С.И., Падалко Н.Л., Соболев П.Н., Дыхан С.В., Праздничных М.И., Черников Е.В. [и др.]. Поверхностная геохимическая съемка, сопровождающая региональные сейсмические исследования Тегульдetsкой впадины (юго-восток Томской области) // Геология и минерально-сырьевые ресурсы Сибири. 2012. № S. С. 94–101. EDN: PIDGHP.
17. Матвиенко Н.Г., Воронюк А.С. Основы обеспечения безопасности освоения газоносных и склонных к самовозгоранию рудных месторождений // Горный информационно-аналитический бюллетень (научно-технический журнал). 2012. № S1. С. 160–171. EDN: QCLETH.
18. Пинкевич М.Н., Дворецкая Ю.Б. Оценка естественных ресурсов подземных вод в пределах Олимпиадинской площади (Енисейский край) // Вестник Воронежского государственного университета. Серия: Геология. 2016. № 1. С. 144–149. EDN: VVSIZV.
19. Соболев В.С., Полякова Л.Л. Некоторые особенности размещения и формирования крупнейших газосодержащих месторождений мира // Нефтегазовая геология. Теория и практика. 2009. Т. 4. № 4. С. 8. Режим доступа: https://ngtp.ru/rub/6/41_2009.pdf (дата обращения 01.04.2024). EDN: KXSTTP.
20. Зорькин Л.М., Крылова Т.А. Использование изотопного состава углерода метана при геохимических поисках залежей нефти и газа // Изотопные и битуминологические методы при поисках нефти и газа: сб. науч. тр. / под ред. Л.М. Зорькина. М.: Изд-во ВНИИгеоинформсистем, 1988. С. 3–15.
21. Тиссо Б., Вельте Д. Образование и распространение нефти / пер. с англ. М.: Мир, 1981. 503 с.
22. Peters K.E. Guidelines for evaluating petroleum source rock using programmed pyrolysis // AAPG Bulletin. 1986. Vol. 70. Iss. 3. P. 318–329. <https://doi.org/10.1306/94885688-1704-11D7-8645000102C1865D>.

References

1. Sazonov A.M., Zvyagina Ye.A., Silyanov S.A., Lobanov K.V., Leontyev S.I., Kalinin Yu.A., et al. Ore genesis of the Olimpiada gold deposit (Yenisei ridge, Russia). *Geosfernye issledovaniya*. 2019;(2):17-43. (In Russ.). <https://doi.org/10.17223/25421379/10/2>. EDN: WLSEZA.
2. Gibsher N.A., Tomilenko A.A., Bul'bak T.A., Ryabukha M.A., Khomenko M.O., Shaparenko E.O., et al. The Olimpiadinskoe gold deposit (Yenisei ridge): temperature, pressure, composition of ore-forming fluids, $\delta^{34}\text{S}$ in sulfides, $^3\text{He}/^4\text{He}$ of fluids, Ar–Ar age, and duration of formation. *Geologiya i geofizika = Geology and Geophysics*. 2019;60(9):1310-1329. (In Russ.). <https://doi.org/10.15372/GiG2019073>. EDN: TPYKPU.
3. Petrova M.A., Shaparenko E.O., Khomenko M.O. Methane-nitrogen-carbon dioxide composition of the gas phase of fluid inclusions in quartz from deep horizons of the Olimpiada deposit according to Raman spectroscopy data. In: *Geologiya: Materialy 58-i Mezhdunar. nauch.-stud. konf. = Geology: Materials of the 58th International scientific and student conference*. 10–13 April 2020, Novosibirsk. Novosibirsk; 2020, p. 81. (In Russ.). EDN: GQUIKF.
4. Fridman A.I. *Natural gases of ore deposits*. Moscow: Nedra; 1970, 192 p. (In Russ.).
5. Matvienko N.G. *The release of natural gases during the development of ore deposits*. Moscow: Nedra; 1988, 229 p. (In Russ.).
6. Behar F., Beaumont V., Penteado H.L.D.B. Rock-Eval 6 technology: performances and developments. *Oil & Gas Science and Technology*. 2001;56(2):111-134. <http://doi.org/10.2516/ogst:2001013>.
7. Starobinets I.S., Kalinko M.K. *Sampling and analysis of natural gases of oil and gas basins*. Moscow: Nedra; 1985, 239 p. (In Russ.).
8. Galimov E.H.M. *Carbon isotopes in oil and gas geology*. Moscow: Nedra; 1973, 379 p. (In Russ.).
9. Kuzovkin V.V., Semenov S.M. Methane in the surface layer of the atmosphere: current content, long-term trends and intra-annual variability. *Fundamentalnaya i prikladnaya klimatologiya*. 2020;3:5-21. (In Russ.). <https://doi.org/10.21513/2410-8758-2020-3-05-21>. EDN: LLQIDM.
10. Rytikova E.I., Yakunina I.I., Blokhina G.G. Isotopic composition of carbon methane of surface gas occurrences. In: Zorkin L.M. (ed.). *Izotopnye i bituminologicheskie metody pri poiskakh nefiti i gaza = Isotopic and bituminological methods in the search for oil and gas*. Moscow: All-Russian Research Institute of Geological, Geophysical and Geochemical Systems; 1988, p. 42-49. (In Russ.).
11. Dakhnova M.V., Kiselev S.M., Bazhenova T.K., Lebedev V.S. Isotopic criteria for predicting the phase composition of hydrocarbons in Riphean and Vendian deposits of the Lena-Tunguska petroleum province. *Geologiya i geofizika = Russian Geology and Geophysics*. 2011;52(8):1199-1209. EDN: NYJKNF.
12. Davis J.C. Statistics and data analysis in geology; 1973, 584 p. (Russ. ed.: *Statisticheskii analiz v geologii. Book 1*. Moscow: Mir; 1990, 319 p.).
13. Starobinets I.S. *Gas-geochemical indicators of oil and gas potential and the forecast of the composition of hydrocarbon accumulations*. Moscow: Nedra; 1986, 198 p. (In Russ.).
14. Shakirov R.B. *Gasgeochemical fields of the Eastern Asia marginal seas. Monograph*. Moscow: GEOS; 2018, 341 p. (In Russ.). EDN: XXTSYR.
15. Alekseev F.A., Voitov G.I., Lebedev V.S., Nesmelova Z.N. *Methane*. Moscow: Nedra; 1978, 310 p. (In Russ.).
16. Golyshev S.I., Padalko N.L., Soboлев P.N., Dykhan S.V., Prazdnichnykh M.I., Chernikov E.V., et al. Surface geochemical survey attendant on regional seismic investigations of the Teguldetskaya depression (the south-east of the Tomsk region). *Geologiya i mineralno-syrevye resursy Sibiri = Geology and Mineral Resources of Siberia*. 2012;(S): 94-101. (In Russ.). EDN: PIDGHP.



17. Matvienko N.G., Voronyuk A.S. Fundamentals of ensuring development safety of gas-bearing and spontaneous combustion-prone ore deposits. *Gornyi informatsionno-analiticheskiy byulleten (nauchno-tehnicheskii zhurnal) = Mining Informational and Analytical Bulletin (scientific and technical journal)*. 2012;(S1):160-171. (In Russ.). EDN: QCLETH.
18. Pinkevich M.N., Dvoretzskaya J.B. Using the hydrometer method for Olympiadinskoye area zoning by exceedance probability of natural groundwater resources. *Vestnik Voronezhskogo gosudarstvennogo universiteta. Seriya: Geologiya = Proceedings of Voronezh State University. Series: Geology*. 2016;(1):144-149. (In Russ.). EDN: VVSIZV.
19. Sobolev V.S., Polyakova L.L. Some peculiarities of distribution and formation of the world's largest gas fields. *Neftegazovaya geologiya. Teoriya i praktika = Petroleum Geology – Theoretical and Applied Studies*. 2009;4(4):8. Available from: https://ngtp.ru/rub/6/41_2009.pdf [Accessed 1st March 2024]. (In Russ.). EDN: KXSTTP.
20. Zorkin L.M., Krylova T.A. Using carbon isotopic composition of methane in geochemical prospecting for oil and gas. In: Zorkin L.M. (ed.). *Izotopnye i bituminologicheskie metody pri poiskakh nefti i gaza = Isotopic and bituminological methods in oil and gas exploration*. Moscow: All-Russian Research Institute of Geological, Geophysical and Geochemical Systems; 1988. p. 3-15. (In Russ.). <https://doi.org/10.1306/94885688-1704-11D7-8645000102C1865D>.
21. Tissot B.P., Welte D.H. Petroleum formation and occurrence: a new approach to oil and gas exploration; 1978, 702 p. (Russ. ed.: *Obrazovaniye i rasprostraneniye nefti*. Moscow: Mir; 1981, 503 p.).
22. Peters K.E. Guidelines for evaluating petroleum source rock using programmed pyrolysis. *AAPG Bulletin*. 1986;70(3):318-329. <https://doi.org/10.1306/94885688-1704-11D7-8645000102C1865D>.

Информация об авторах / Information about the authors



Ковалев Артем Андреевич,
инженер-геолог,
ООО Центр геотехнологических исследований «Прогноз»,
г. Красноярск, Россия,
✉ kovalevartom@mail.ru
<https://orcid.org/0009-0008-5748-5762>
Artem A. Kovalev,
Geologist Engineer,
LLC CGI "PROGNOZ",
Krasnoyarsk, Russia,
✉ kovalevartom@mail.ru
<https://orcid.org/0009-0008-5748-5762>



Карпов Виктор Александрович,
главный горняк,
АО «Полюс Красноярск»,
г. Красноярск, Россия,
karpovv159@yandex.ru
<https://orcid.org/0009-0005-9981-3750>
Victor A. Karpov,
Chief Miner,
JSC "Polyus Krasnoyarsk",
Krasnoyarsk, Russia,
karpovv159@yandex.ru
<https://orcid.org/0009-0005-9981-3750>



Макаров Владимир Александрович,
доктор геолого-минералогических наук, профессор,
заведующий кафедрой геологии месторождений и методики разведки,
Институт цветных металлов,
Сибирский федеральный университет,
г. Красноярск, Россия,
VMakarov@sfu-kras.ru
<https://orcid.org/0009-0005-5971-8070>
Vladimir A. Makarov,
Dr. Sci. (Geol. & Mineral.), Professor,
Head of the Department of Deposit Geology and Exploration Methods,
School of Non-Ferrous Metals,
Siberian Federal University,
Krasnoyarsk, Russia,
VMakarov@sfu-kras.ru
<https://orcid.org/0009-0005-5971-8070>



Падалко Наталия Львовна,
кандидат химических наук,
научный сотрудник,
Томский филиал АО «Сибирский научно-исследовательский
институт геологии, геофизики и минерального сырья»,
г. Томск, Россия,
isotopnata@mail.ru
<https://orcid.org/0009-0002-6440-2036>
Nataliya L. Padalko,
Cand. Sci. (Chem.),
Researcher,
JSC "SNIGG and MS",
Tomsk, Russia,
isotopnata@mail.ru
<https://orcid.org/0009-0002-6440-2036>

Вклад авторов / Contribution of the authors

А.А. Ковалев – формулировка ключевых целей и задач исследования, проведение исследований, анализ и интерпретация полученных данных, визуализация данных, составление черновика рукописи.

В.А. Карпов – формирование идеи исследования, сбор данных, участие в научном дизайне, ресурсное обеспечение проекта.

В.А. Макаров – администрирование и ресурсное обеспечение проекта, научное редактирование рукописи.

Н.Л. Падалко – проведение лабораторных исследований, анализ и интерпретация полученных данных, редактирование и доработка рукописи.

A.A. Kovalev set the key research goals and objectives, conducted the research, analyzed and interpreted the data obtained, performed data visualization, prepared the manuscript.

V.A. Karpov formed the research idea, collected data, participated in scientific designing, ensured resource support of the project.

V.A. Makarov provided administrative and resource support of the project, performed scientific editing of the manuscript.

N.L. Padalko carried out the laboratory research, analyzed and interpreted the data obtained, edited and revised the manuscript.

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 01.03.2024; одобрена после рецензирования 15.03.2024; принята к публикации 21.03.2024.

The article was submitted 01.03.2024; approved after reviewing 15.03.2024; accepted for publication 21.03.2024.



ГЕОЛОГИЯ, ПОИСКИ И РАЗВЕДКА ТВЕРДЫХ ПОЛЕЗНЫХ ИСКОПАЕМЫХ, МИНЕРАГЕНИЯ

Краткое сообщение

УДК 552.16:552.4:552.13

EDN: JECNPC

DOI: 10.21285/2686-9993-2024-47-1-35-43



Сульфидная минерализация в орогенных эклогитах Северо-Муйского блока (северо-восточное Забайкалье): генезис и первые данные об изотопном составе серы

С.Ю. Скузоватов^{a✉}, Ю.И. Тарасова^b

^{a,b}Институт геохимии им. А.П. Виноградова СО РАН, г. Иркутск, Россия

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

Резюме. Процессам субдукции сопутствуют гидротермальные проявления, в том числе крупные месторождения золота и переходных металлов островодужного и задугового происхождения, а вулканические дуги вмещают большую часть мировых запасов ряда металлических полезных ископаемых. Вместе с тем роль надсубдукционного переноса металлов и сопутствующая роль окислительно-восстановительных процессов в их формировании до сих пор не представляется однозначной и требует прямых исследований сульфидных минералов в высокobarических комплексах, стадийности формирования и сохранности сульфидов в процессе прогрессивного и пикового метаморфизма. С целью характеристики поведения халькофильных элементов в палеозонах континентальной субдукции нами выполнены предварительные минералогические (SEM-EDX) и изотопные (S) исследования сульфидов из эклогитов Северо-Муйского блока (северо-восточное Забайкалье). Сульфидная минерализация пирит-халькопирит-пирротинового состава имеет метасоматическое происхождение, связанное с процессами ретроградного флюидного преобразования исходно «сухих» эклогитовых парагенезисов на стадии эксгумации на ниже-средне-коровые уровни после или синхронно с декомпрессией и формированием плагиоклаз-диопсид±амфиболовых симплектитов (ниже 10–12 Кбар). Крайне неоднородный изотопный состав серы ($\delta^{34}\text{S}_{\text{VCDT}}$) пирита обусловлен разными источниками флюидов, которые могли иметь метаосадочное происхождение (от -8,2 до -6 ‰) в парагнейсовых сегментах Северо-Муйского блока, но могли преимущественно буферироваться гидротермально измененными метабазитами в других (от +0,7 до +7,1 ‰). Альтернативным механизмом могло быть участие единого преимущественно окисленного (сульфатсодержащего) флюида с существенным изотопным фракционированием (до ~15–20 ‰).

Ключевые слова: субдукция, эклогит, флюид, метасоматоз, сульфидная минерализация, изотопный состав серы

Финансирование: Исследование выполнено при поддержке Российского научного фонда (проект № 21-77-10038, <https://rscf.ru/project/21-77-10038>).

Для цитирования: Скузоватов С.Ю., Тарасова Ю.И. Сульфидная минерализация в орогенных эклогитах Северо-Муйского блока (северо-восточное Забайкалье): генезис и первые данные об изотопном составе серы // Науки о Земле и недропользование. 2024. Т. 47. № 1. С. 35–43. <https://doi.org/10.21285/2686-9993-2024-47-1-35-43>. EDN: JECNPC.

GEOLOGY, PROSPECTING AND EXPLORATION OF SOLID MINERALS, MINERAGENY

Brief report

Sulfide mineralization in orogenic eclogites of the North Muya block (northeastern Transbaikalia): genesis and the first data on the isotopic composition of sulfur

Sergei Yu. Skuzovatov^{a✉}, Yulia I. Tarasova^b

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

^bIrkutsk National Research Technical University, Irkutsk, Russia

© Скузоватов С.Ю., Тарасова Ю.И., 2024



Abstract. Subduction processes are accompanied by the sites of hydrothermal activity including large deposits of gold and transitional metals of island-arc or back-arc origin, whereas volcanic arcs host most part of the worldwide resources of metallic minerals. However, the role of suprasubduction metal transfer and the associated role of redox processes in their formation are still ambiguous and require direct studies of sulfide mineralization in high-pressure rocks, as well as their formation stages and sulfide preservation during progressive and peak metamorphism. In order to describe the behavior of chalcophile elements in the paleozones of continental subduction we performed preliminary mineralogical (SEM-EDX) and isotope (S) studies of sulfides in the North Muya block eclogites (northeastern Transbaikalia). Sulfide mineralization of pyrite-chalcopyrite-pyrrhotite composition has a metasomatic origin associated with the retrograde fluid transformation of initially “dry” eclogite assemblages during exhumation to lower- or mid-crust levels after or synchronously to the decompression and formation of plagioclase-diopside±amphibole symplectites (below 10–12 kbar). Extremely heterogeneous isotopic composition of pyrite sulfur ($\delta^{34}\text{S}_{\text{VCDT}}$) was caused by various sources of fluids of presumably metasedimentary origin (from -8.2 to -6 ‰) in the paragneiss segments of the North Muya block. But they also could be predominantly buffered by hydrothermally altered metabasites (from +0.7 to +7.1 ‰). An alternative mechanism could be the participation of a single predominantly oxidized (sulfate-containing) fluid with the significant isotopic fractionation (up to ~15–20‰).

Keywords: subduction, eclogite, fluid, metasomatism, sulfide mineralization, sulfur isotopic composition

Funding: The research was funded by the Russian Science Foundation (project No. 21-77-10038, <https://rscf.ru/project/21-77-10038>).

For citation: Skuzovatov S.Yu., Tarasova Yu.I. Sulfide mineralization in orogenic eclogites of the North Muya block (northeastern Transbaikalia): genesis and the first data on the isotopic composition of sulfur. *Nauki o Zemle i nedropol'zovanie = Earth sciences and subsoil use*. 2024;47(1):35-43. (In Russ.). <https://doi.org/10.21285/2686-9993-2024-47-1-35-43>. EDN: JECNPC.

Введение

Зоны субдукции представляют собой обстановки длительного химического рециклинга между геосферами Земли. Метаморфогенные флюиды, являющиеся результатом прогрессивной регидратации погружающегося слэба, играют ключевую роль в массопереносе при рециклировании корового субстрата и летучих компонентов в мантию и инициацию надсубдукционного вулканизма [1]. В частности, процессам субдукции сопутствуют гидротермальные проявления, в том числе крупных месторождений золота и переходных металлов островодужного и задугового происхождения, а вулканические дуги вмещают большую часть мировых запасов основных (медь, олово, сурьма, молибден) и благородных (золото, серебро) металлов [2, 3]. Вместе с тем роль надсубдукционного переноса металлов и сопутствующая роль окислительно-восстановительных агентов (к примеру, серы) в формировании месторождений и рудопроявлений до сих пор не представляются однозначными. В связи с этим в последние десятилетия значительно вырос объем данных изучения состава сульфидных минералов [4–10] и изотопных характеристик серы сульфидов, наблюдаемых в высокобарических комплексах (метаосадочные породы, метабазиты, серпентиниты), стадийности формирования и сохранности сульфидов в процессе прогрессивного и пикового метаморфизма. В то же время большинство подобных работ посвящено хорошо изученным палеоокеаническим комплексам (например, исследования [9, 10]).

С целью характеристики поведения халькофильных элементов и ряда иных металлов и неметаллов, свойственных для сульфидных фаз в высокобарических комплексах континентального происхождения, выполнены предварительные минералогические (SEM-EDX) и изотопные (S) исследования сульфидов из эклогитов Северо-Муйского блока (северо-восточное Забайкалье) [11, 12].

Материалы и методы исследования

Предварительные минералого-петрографические исследования показали, что значимые количества сульфидных фаз наблюдаются в эклогитах участка р. Илеир (южная часть Северо-Муйского блока), в различной степени затронутой ретроградной амфиболизацией, хлоритизацией и окварцеванием [12], тогда как наиболее свежие и амфиболизированные эклогиты основного эклогитового пояса (участок р. Илеир) обнаруживают лишь следовые количества сульфидных фаз или вовсе их отсутствие. Для исследования были выбраны шесть образцов метабазитов: три образца типичных симплектитовых эклогитов с первичным омфацитом, полностью замещенным плагиоклаз-диопсид-амфиболовым симплектитовым агрегатом, и локальным развитием ретроградной амфиболизации; два образца эклогитов схожего типа, но с значительной степенью амфиболизации (порфиروبластовый кальциево-натриевый и кальциевый амфибол, кальциевые амфиболы в симплектите



и в каймах обрастания граната), один образец эклогита, ретроградно преобразованного до состояния эпидотового амфиболита (таблица).

Петрографические характеристики в полированных шлифах исследованы с использованием поляризационного микроскопа Zeiss Axiolab, детальный анализ ассоциаций сульфидных минералов и микроструктур – с использованием микроскопа Olympus BX-53. Идентификация фаз и их полуколичественный анализ выполнены с применением сканирующего электронного микроскопа Tescan MIRA 3 LMH, оснащенного системой энергодисперсионного анализа AztecLive Advanced Ultim Max 40 system (Oxford Instruments Analytical Ltd.) в Центре коллективного пользования «Изотопно-геохимических исследований» Института геохимии им. А.П. Виноградова СО РАН (г. Иркутск) [13].

Для исследования изотопного состава серы были отобраны минеральные монофракции пирита максимальной крупности для каждого образца (преимущественно 0,16–0,25 мм в симплектитовых эклогитах, до 0,5 мм в существенно преобразованных metabазитах). Исследования навесок ~10 мг проведены в Центре коллективного пользования «Мульти-элементных исследований» Института геологии и минералогии им. В.С. Соболева СО РАН (г. Новосибирск) на масс-спектрометре Finnigan MAT Delta V Advantage. Точность и воспроизводимость результатов контролировались повторными измерениями стандартов IAEA-S-1 (сульфид серебра, $\delta^{34}\text{S} = -0,3$), IAEA-S-2 (сульфид серебра, $\delta^{34}\text{S} = +22,7$), IAEA-S-3 (сульфид серебра, $\delta^{34}\text{S} = -32,3$) и NBS-123 (сфалерит, $\delta^{34}\text{S} = +17,4$). Воспроизводимость результатов по неизвестным образцам – в пределах 0,1 ‰ (2 σ), данные приведены в величинах $\delta^{34}\text{S}$ относительно стандарта CDT (Canyon Diablo Troilite).

Результаты исследования и их обсуждение

Сульфидная минерализация в эклогитах представлена преимущественно рассеянным

пиритом в виде отдельных зерен размером от первых десятков-сотни микрон до первых миллиметров, от ксеноморфных и округлых выделений (прежде всего в симплектитовых эклогитах) до идиоморфных крупных кристаллов (наиболее характерно для амфиболизированных эклогитов и амфиболита), зачастую с обильными пойкилитовыми включениями (рис. 1, 2). Рассеянная минерализация пространственно приурочена к интерстициям между породообразующими силикатами и часто ассоциирует с титан-содержащими фазами эклогитов (рутилом, ильменитом и титанитом), в ряде случаев – со структурами их замещения (рутил-ильменит, ильменит-титанит; см. рис. 1, d; 2, b–g). В амфиболите по эклогу крупные идиобласты пирита наблюдаются в карбонатных (кальцитовых) обособлениях (см. рис. 2, j). В качестве самостоятельной фазы и в виде сростаний с пиритом присутствует ксеноморфный интерстициальный халькопирит (см. рис. 1, a, d, h; 2, a), который, однако, чаще наблюдается в виде включений и вростков (?) в пирите-хозяине (см. рис. 1, b, d, e, f; 2, d, f, g, i, j), причем при частичном замещении/разложении пирита характерные структуры халькопирита в пирите сохраняются (см. рис. 2, f). Более редок в качестве самостоятельной фазы пирротин (см. рис. 1, a, h; 2, a, b, h); в наименее амфиболизированных симплектитовых эклогитах он наблюдается в качестве отдельных субидиоморфных зерен и ксеноморфных выделений (см. рис. 1, a, h), а также реликтов среди продуктов замещения с сидеритом (см. рис. 2, e), а в существенно измененных эклогитах не обнаружен. Единожды, в образце симплектитового эклогита Му-12-6, обнаружен сфалерит/вюртцит (см. рис. 2, b). По первичным сульфидам (прежде всего пириту) развиваются гидроокислы железа (см. рис. 1, c; 2, l), нукундамит (см. рис. 2, g, h), смитит. Крупные субидиоморфные и идиоморфные зерна пирита повсеместно содер-

Изотопный состав серы пирита из эклогитов Северо-Муйского блока Isotopic composition of pyrite sulfur from the North Muya block eclogites

Образец	Структурно-текстурный тип	$\delta^{34}\text{S}$, ‰
Mu-12-6	Симплектитовый, слабо амфиболизированный эклогит	-7,4
Mu-12-9		-6
Mu-12-10		-8,2
Mu-13-3'	Умеренно амфиболизированный эклогит	+1,6
Mu-13-5b		+0,7
Mu-13-21	Апоэклогитовый амфиболит	+7,1



жат включения силикатных, прежде всего водосодержащих ретроградных фаз (амфибол, эпидот), реже – граната, а также титаносодержащих фаз (преимущественно титанита, реже – рутила) (к примеру, см. рис. 2, *к*), а также барит (см. рис. 2, *с*), распространение которого фиксируется на EDX-картах пирита.

Полученные значения $\delta^{34}\text{S}$ для шести монофракций пирита обнаруживают значительную неоднородность по изотопному составу (см. таблицу). Для трех образцов симплектитовых эклогитов слабой степени амфиболизации получены единообразные отрицательные величины $\delta^{34}\text{S}$ в диапазоне от -8,2 до -6 ‰, тогда как для заметно регидратированных разностей

значения $\delta^{34}\text{S}$ варьируются от слабо положительных (+0,7 и +1,8 ‰) до умеренно высоких (+7,1 ‰).

В условиях дефицита метаморфогенных флюидов сульфиды (в частности, пирит) способны сохранять элементный и изотопный состав вплоть до условий эклогитовой и гранулитовой фации [6, 14, 15]. Однако отсутствие ассоциаций сульфидных или сульфидно-силикатных фаз во включениях в гранате [4], а также характер выделения сульфидной минерализации (преимущественно крупный идиоморфный пирит в ассоциации с халькопиритом/пирротинитом, с нукундамитом, смититом, окислами и гидроокислами железа)

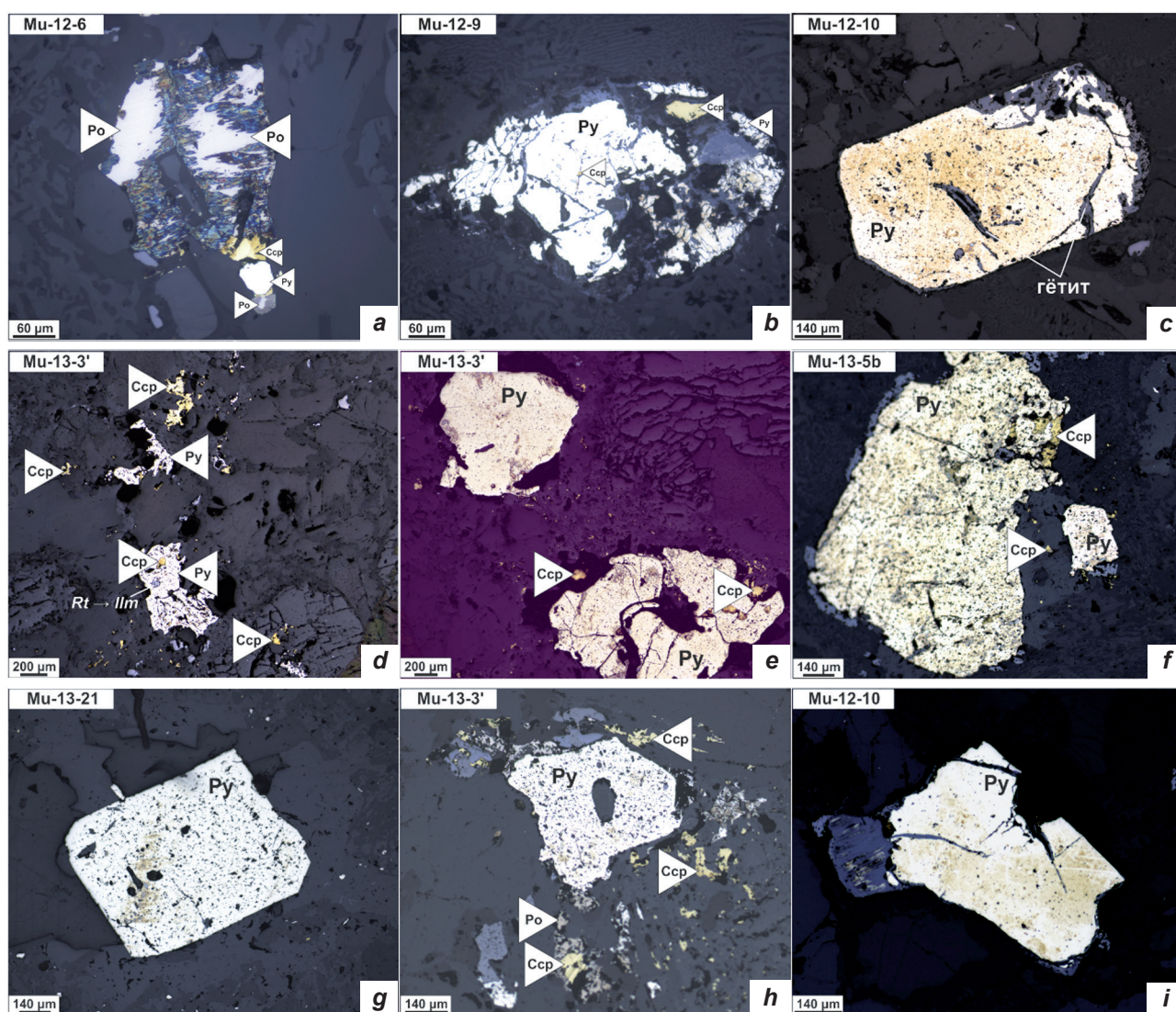


Рис. 1. Типовые ассоциации сульфидных минералов в симплектитовых и амфиболизированных эклогитах и их взаимоотношения с породообразующими силикатами и акцессорными оксидными минералами (фотографии в отраженном свете)

Po – пирротин; *Ccp* – халькопирит; *Py* – пирит; *Rt* – рутил; *Ilm* – ильменит

Fig. 1. Typical assemblages of sulfide minerals in symplectitic and amphibolized eclogites and their relationships with rock-forming silicates and accessory oxide phases (reflected-light photomicrographs)

Po – pyrrhothite; *Ccp* – chalcopyrite; *Py* – pyrite; *Rt* – rutile; *Ilm* – ilmenite

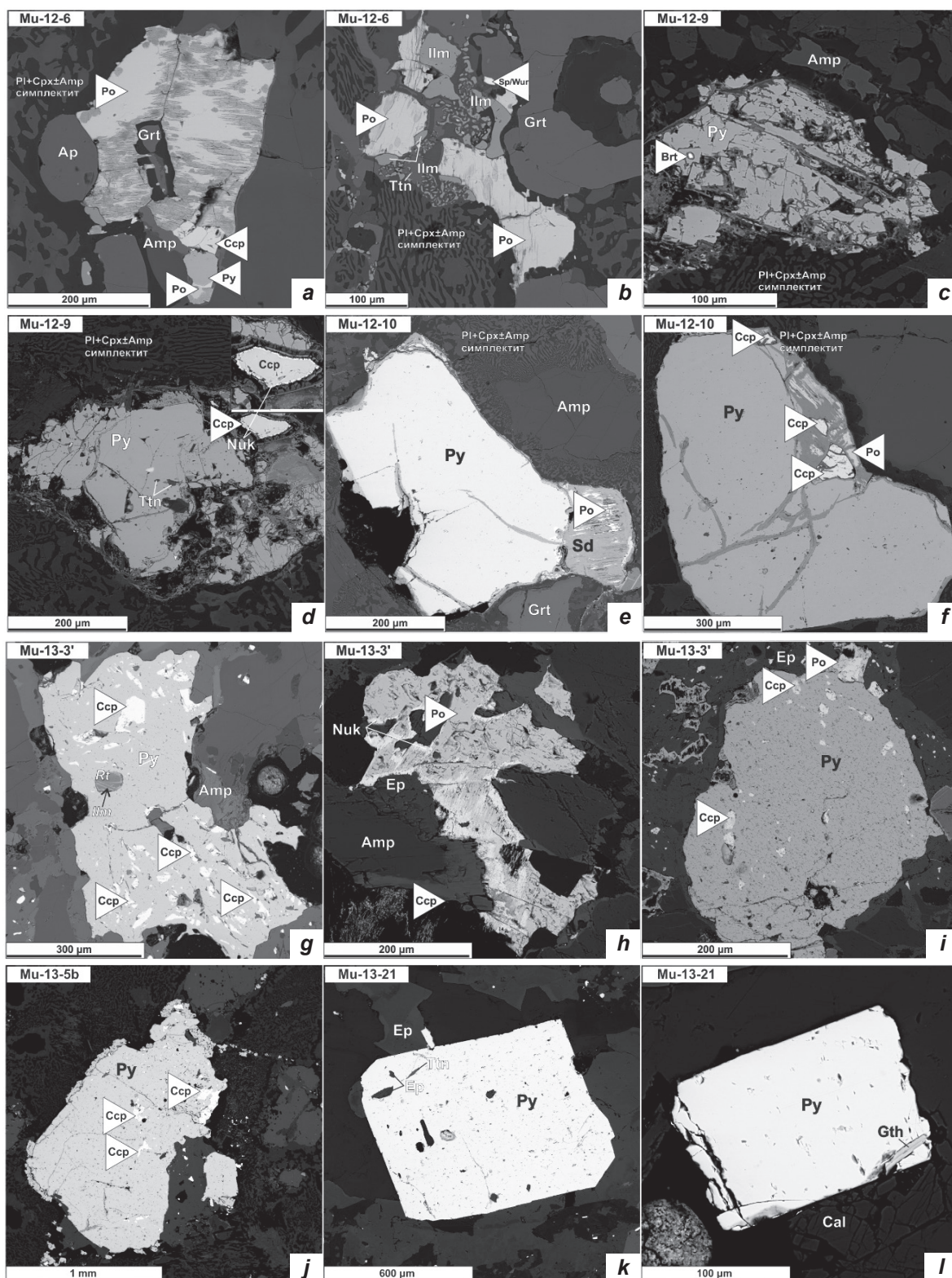


Рис. 2. Типовые ассоциации сульфидных минералов в симплектитовых и амфиболизированных эклогитах и их взаимоотношения с породообразующими силикатами и акцессорными оксидными минералами (микрофотографии в режиме обратно рассеянных электронов)

Po – пирротин; Ccp – халькопирит; Py – пирит; Rt – рутил; Ilm – ильменит; Ap – апатит; Grt – гранат; Amp – амфибол; Ttn – титанит; Sp/Wur – сфалерит/вюрцит; Pl-Cpx – плагиоклаз-клинопироксеновый симплектит; Brt – барит; Nuk – нукундамит; Sd – сидерит; Ep – эпидот; Gth – гетим; Cal – кальцит

Fig. 2. Typical assemblages of sulfide minerals in symplectitic and amphibolized eclogites and their relationships with rock-forming silicates and accessory oxide phases (backscattered electron images)

Po – pyrrhothite; Ccp – chalcopyrite; Py – pyrite; Rt – rutile; Ilm – ilmenite; Ap – apatite; Grt – garnet; Amp – amphibole; Ttn – titanite; Sp/Wur – sphalerite/wurtzite; Pl-Cpx – plagioclase-clinopyroxene symplectite; Brt – barite; Nuk – nukundamite; Sd – siderite; Ep – epidote; Gth – goethite; Cal – calcite



указывают на ретроградный и, таким образом, гидротермально-метасоматический генезис сульфидов в эклогитах. Парагенезис минеральных включений (пиковые рутил и гранат, ретроградные эпидот, амфибол и титанит), обнаруженный в пирите и других сульфидах, а также отсутствие ассоциаций зеленосланцевой фации как в самих сульфидах, так и в матриксе пород, предполагают формирование сульфидов после достижения пика метаморфизма. Нукундамит наряду с ковеллином может быть частью проградных парагенезисов (к примеру, лавсонитовых голубых сланцев и эклогитов [4]), однако устойчив в ограниченном диапазоне фугитивности серы ($\sim 0,4$ логарифмических единицы f_{S_2}) и не устойчив в более высокотемпературных условиях (диапазон $\sim 430\text{--}500\text{ }^{\circ}\text{C}$) и при высоких давлениях, подвергаясь десульфидизации до пирита и борнита/халькопирита. Образование нукундамита, таким образом, дополнительно ограничивает условия основной пирит-халькопирит-пирротиновой минерализации температурами от $\sim 600\text{ }^{\circ}\text{C}$ (ниже максимума при погружении пород и максимальная температура устойчивости пирита [16]) до $\sim 430\text{ }^{\circ}\text{C}$ и при декомпрессии как минимум до 10–12 Кбар. Не исключается, однако, что часть сульфидов, прежде всего пирротин-халькопиритовых парагенезисов, имеет первичное (проградное происхождение) и могла не претерпеть рекристаллизацию в силу ограниченной доступности флюидов [12]. В общем случае флюиды в равновесии с типичными метабазами, генерируемые при дегидратации водосодержащих фаз (лавсонита, эпидота, амфибола), могут содержать не более 1 % S [17, 18] и, таким образом, должны иметь незначительный эффект на первичные сульфиды.

В различной степени положительные значения $\delta^{34}\text{S}$ ранее неоднократно приводились для метаморфогенных сульфидов из высокобарических метабазитов [5, 6, 9], однако значения от нулевых до отрицательных наблюдались ранее прежде всего для сульфидов из метаосадочных пород. Дж.Б. Уолтерс с соавторами [9] предложил, что такой значительный диапазон, включающий сильно отрицательные величины $\delta^{34}\text{S}$, должен быть продуктом метасоматического, нежели метаморфогенного, происхождения сульфидов из эволюционирующего, преимущественно окисленного (сульфатсодержащего), флюида. Дан-

ное предположение согласуется с нашими наблюдениями включений (а также потенциально более распространенных микровключений того же барита) в сульфидах, но не исключает возможности участия восстановленных (содержащих H_2S и/или HS^-) флюидов, буферизуемых субстратом метабазитов. На данном этапе представляется более вероятным, что неоднородный изотопный состав серы контролируется разными источниками флюидов, которые вероятно имели метаосадочное происхождение ($-8,2$ до $-6\text{ }_{\text{‰}}$) в преимущественно парагенезисовых сегментах Северо-Муйского блока, но могли иметь смешанную природу или преимущественно локально буферизовались метабазами в других ($+0,7$ и $+1,8\text{ }_{\text{‰}}$) до умеренно высоких ($+7,1\text{ }_{\text{‰}}$). Возможность участия в формировании минерализации контрастных по составу флюидов могла в таком случае определяться их генерацией на разных уровнях литосферы [19] или тектоническим совмещением различных по литологии сегментов континентальной коры.

Заключение

Сульфидная минерализация в орогенных эклогитах континентального типа Северо-Муйского блока имеет метасоматическое происхождение, связанное с процессами ретроградного флюидного преобразования исходно «сухих» эклогитовых парагенезисов на стадии эксгумации на ниже-среднекоровые уровни после или синхронно с декомпрессией и формированием плагиоклаз-диопсид±амфиболовых симплектитов (ниже 10–12 Кбар). Сульфидная минерализация в эклогитах имеет пирит-халькопиритовый состав с подчиненным количеством пирротина. Крайне неоднородный изотопный состав серы ($\delta^{34}\text{S}_{\text{VCDT}}$) пирита контролируется разными источниками флюидов, которые вероятно имели метаосадочное происхождение (от $-8,2$ до $-6\text{ }_{\text{‰}}$) в преимущественно парагенезисовых сегментах Северо-Муйского блока, но могли преимущественно буферизоваться составом гидротермально измененных метабазитов в других (от $+0,7$ до $+7,1\text{ }_{\text{‰}}$). Альтернативным механизмом, объясняющим вариации $\delta^{34}\text{S}_{\text{VCDT}}$, может быть участие единого эволюционирующего по составу преимущественно окисленного (сульфатсодержащего) флюида, для которого факторы изотопного фракционирования в паре сульфат-сульфид при $\sim 500\text{ }^{\circ}\text{C}$ могут достигать $\sim 15\text{--}20\text{ }_{\text{‰}}$. Таким образом, изотопный состав



серы может быть прямым индикатором неоднородного строения Северо-Муйского блока на глубинных уровнях с различными пропор-

циями эксгумированного метабазитового субстрата или степени эволюции состава флюидов.

Список источников

1. Bebout G.E. The impact of subduction-zone metamorphism on mantle-ocean chemical cycling // *Chemical Geology*. 1995. Vol. 126. Iss. 2. P. 191–218. [https://doi.org/10.1016/0009-2541\(95\)00118-5](https://doi.org/10.1016/0009-2541(95)00118-5).
2. Cooke D.R., Simmons S.F. Characteristics and genesis of epithermal gold deposits // *Society of Economic Geologists*. 2000. Vol. 13. P. 221–244. <https://doi.org/10.5382/Rev.13.06>.
3. Sillitoe R.H. Major gold deposits and belts of the North and South American Cordillera: distribution, tectonomagmatic settings, and metallogenic considerations // *Economic Geology*. 2008. Vol. 103. Iss. 4. P. 663–687. <https://doi.org/10.2113/gsecongeo.103.4.663>.
4. Brown J.L., Christy A.G., Ellis D.J., Arculus R.J. Prograde sulfide metamorphism in blueschist and eclogite, New Caledonia // *Journal of Petrology*. 2014. Vol. 55. Iss. 3. P. 643–670. <https://doi.org/10.1093/petrology/egu002>.
5. Crossley R.J., Evans K.A., Jeon H., Kilburn, M.R. Insights into sulfur cycling in subduction zones from in-situ isotope analysis of sulphides in high-pressure serpentinites and 'hybrid' samples from Alpine Corsica // *Chemical Geology*. 2018. Vol. 493. P. 359–378. <https://doi.org/10.1016/j.chemgeo.2018.06.014>.
6. Evans K.A., Tomkins A.G., Cliff J., Fiorentini M.L. Insights into subduction zone sulfur recycling from isotopic analysis of eclogite-hosted sulfides // *Chemical Geology*. 2014. Vol. 365. P. 1–19. <https://doi.org/10.1016/j.chemgeo.2013.11.026>.
7. Li J.-L., Klemd R., Huang G.-F., Ague J.J., Gao J. Unravelling slab $\delta^{34}\text{S}$ compositions from in-situ sulphide $\delta^{34}\text{S}$ studies of high-pressure metamorphic rocks // *International Geology Review*. 2021. Vol. 63. Iss. 1. P. 109–129. <https://doi.org/10.1080/00206814.2020.1827305>.
8. Li J.L., Schwarzenbach E.M., John T., Ague J.J., Huang F., Gao J., et. al. Uncovering and quantifying the subduction zone sulfur cycle from the slab perspective // *Nature Communications*. 2020. Vol. 11. P. 514. <https://doi.org/10.1038/s41467-019-14110-4>.
9. Walters J.B., Cruz-Urbe A.M., Marschall H.R. Isotopic compositions of sulfides in exhumed high-pressure terranes: implications for sulfur cycling in subduction zones // *Geochemistry Geophysics Geosystems*. 2019. Vol. 20. <https://doi.org/10.1029/2019GC008374>.
10. Walters J.B., Cruz-Urbe A.M., Marschall H.R., Boucher B. The role of sulfides in the chalcophile and siderophile element budget of the subducted oceanic crust // *Geochimica et Cosmochimica Acta*. 2021. Vol. 304. P. 191–215. <https://doi.org/10.1016/j.gca.2021.04.016>.
11. Skuzovатов S.Yu., Shatsky V.S., Wang K.-L. Continental subduction during arc-microcontinent collision in the southern Siberian craton: constraints on protoliths and metamorphic evolution of the North Muya complex eclogites (Eastern Siberia) // *Lithos*. 2019. Vol. 342–343. P. 76–96. <https://doi.org/10.1016/j.lithos.2019.05.022>.
12. Skuzovатов S.Yu. Differential fluid activity in a single exhumed continental subduction unit from local P-T-M(H_2O) records of zoned amphiboles (North Muya, Eastern Siberia) // *Minerals*. 2022. Vol. 12. Iss 2. P. 217. <https://doi.org/10.3390/min12020217>.
13. Скузоватов С.Ю., Белозерова О.Ю., Васильева И.Е., Зарубина О.В., Канева Е.В., Сокольников Ю.В. [и др.]. Центр коллективного пользования «изотопно-геохимических исследований» ИГХ СО РАН: современное состояние методов изучения вещества на микро- и макроуровне // *Геодинамика и тектонофизика*. 2022. Т. 13. № 2. С. 585. <https://doi.org/10.5800/GT-2022-13-2-0585>. EDN: JWAGUK.
14. Craig J.R., Vokes F.M. The metamorphism of pyrite and pyritic ores: an overview // *Mineralogical Magazine*. 1993. Vol. 57. P. 3–18. <https://doi.org/10.1180/minmag.1993.057.386.02>.
15. Acken D.V., Su W., Gao J., Creaser R.A. Preservation of Re-Os isotope signatures in pyrite throughout low-T, high-P eclogite facies metamorphism // *Terra Nova*. 2014. Vol. 26. P. 402–407. <https://doi.org/10.1111/ter.12113>.
16. Hill R.E.T. Experimental study of phase relation at 600C in a portion of the Fe-Ni-Cu-S system and its application to natural sulphide assemblages // *Sulphide deposits in mafic and ultramafic rocks* / eds D.L. Buchanan, M.J. Jones. London: The Institution of Mining and Metallurgy, 1984. P. 14–21.
17. Connolly J.A.D., Cesare B. C-O-H-S fluid composition and oxygen fugacity in graphitic metapelites // *Journal of Metamorphic Geology*. 1993. Vol. 11. P. 379–388. <https://doi.org/10.1111/j.1525-1314.1993.tb00155.x>.
18. Tomkins A.G. Windows of metamorphic sulfur liberation in the crust: implications for gold deposit genesis // *Geochimica et Cosmochimica Acta*. 2010. Vol. 74. P. 3246–3259. <https://doi.org/10.1016/j.gca.2010.03.003>.
19. Tomkins A.G., Evans K.A. Separate zones of sulfate and sulfide release from subducted mafic oceanic crust // *Earth and Planetary Science Letters*. 2015. Vol. 428. P. 73–83. <https://doi.org/10.1016/j.epsl.2015.07.028>.

References

1. Bebout G.E. The impact of subduction-zone metamorphism on mantle-ocean chemical cycling. *Chemical Geology*. 1995;126(2):191–218. [https://doi.org/10.1016/0009-2541\(95\)00118-5](https://doi.org/10.1016/0009-2541(95)00118-5).
2. Cooke D.R., Simmons S.F. Characteristics and genesis of epithermal gold deposits. *Society of Economic Geologists*. 2000;13:221–244. <https://doi.org/10.5382/Rev.13.06>.



3. Sillitoe R.H. Major gold deposits and belts of the North and South American Cordillera: distribution, tectonomagmatic settings, and metallogenic considerations. *Economic Geology*. 2008;103(4):663-687. <https://doi.org/10.2113/gsecongeo.103.4.663>.
4. Brown J.L., Christy A.G., Ellis D.J., Arculus R.J. Prograde sulfide metamorphism in blueschist and eclogite, New Caledonia. *Journal of Petrology*. 2014;55(3):643-670. <https://doi.org/10.1093/ptrology/egu002>.
5. Crossley R.J., Evans K.A., Jeon H., Kilburn, M.R. Insights into sulfur cycling in subduction zones from in-situ isotope analysis of sulphides in high-pressure serpentinites and 'hybrid' samples from Alpine Corsica. *Chemical Geology*. 2018;493:359-378. <https://doi.org/10.1016/j.chemgeo.2018.06.014>.
6. Evans K.A., Tomkins A.G., Cliff J., Fiorentini M.L. Insights into subduction zone sulfur recycling from isotopic analysis of eclogite-hosted sulfides. *Chemical Geology*. 2014;365:1-19. <https://doi.org/10.1016/j.chemgeo.2013.11.026>.
7. Li J.-L., Klemd R., Huang G.-F., Ague J.J., Gao J. Unravelling slab $\delta^{34}\text{S}$ compositions from in-situ sulphide $\delta^{34}\text{S}$ studies of high-pressure metamorphic rocks. *International Geology Review*. 2021;63(1):109-129. <https://doi.org/10.1080/00206814.2020.1827305>.
8. Li J.L., Schwarzenbach E.M., John T., Ague J.J., Huang F., Gao J., et. al. Uncovering and quantifying the subduction zone sulfur cycle from the slab perspective. *Nature Communications*. 2020;11:514. <https://doi.org/10.1038/s41467-019-14110-4>.
9. Walters J.B., Cruz-Urbe A.M., Marschall H.R. Isotopic compositions of sulfides in exhumed high-pressure terranes: implications for sulfur cycling in subduction zones. *Geochemistry Geophysics Geosystems*. 2019;20. <https://doi.org/10.1029/2019GC008374>.
10. Walters J.B., Cruz-Urbe A.M., Marschall H.R., Boucher B. The role of sulfides in the chalcophile and siderophile element budget of the subducted oceanic crust. *Geochimica et Cosmochimica Acta*. 2021;304:191-215. <https://doi.org/10.1016/j.gca.2021.04.016>.
11. Skuzovatov S.Yu., Shatsky V.S., Wang K.-L. Continental subduction during arc-microcontinent collision in the southern Siberian craton: constraints on protoliths and metamorphic evolution of the North Muya complex eclogites (Eastern Siberia). *Lithos*. 2019;342-343:76-96. <https://doi.org/10.1016/j.lithos.2019.05.022>.
12. Skuzovatov S.Yu. Differential fluid activity in a single exhumed continental subduction unit from local P-T-M(H_2O) records of zoned amphiboles (North Muya, Eastern Siberia). *Minerals*. 2022;12(2):217. <https://doi.org/10.3390/min12020217>.
13. Skuzovatov S.Yu., Belozerova O.Yu., Vasil'eva I.E., Zarubina O.V., Kaneva E.V., Sokolnikova Yu.V., et. al. Centre of isotopic and geochemical research (IGC SB RAS): current state of micro- and macroanalysis. *Geodinamika i tektonofizika = Geodynamics & Tectonophysics*. 2022;13(2):585. (In Russ.). <https://doi.org/10.5800/GT-2022-13-2-0585>. EDN: JWAGUK.
14. Craig J.R., Vokes F.M. The metamorphism of pyrite and pyritic ores: an overview. *Mineralogical Magazine*. 1993;57:3-18. <https://doi.org/10.1180/minmag.1993.057.386.02>.
15. Acken D.V., Su W., Gao J., Creaser R.A. Preservation of Re-Os isotope signatures in pyrite throughout low-T, high-P eclogite facies metamorphism. *Terra Nova*. 2014;26:402-407. <https://doi.org/10.1111/ter.12113>.
16. Hill R.E.T. Experimental study of phase relation at 600C in a portion of the Fe-Ni-Cu-S system and its application to natural sulphide assemblages. In: Buchanan D.L., Jones M.J. (eds). *Sulphide deposits in mafic and ultramafic rocks*. London: The Institution of Mining and Metallurgy; 1984, p. 14-21.
17. Connolly J.A.D., Cesare B. C-O-H-S fluid composition and oxygen fugacity in graphitic metapelites. *Journal of Metamorphic Geology*. 1993;11:379-388. <https://doi.org/10.1111/j.1525-1314.1993.tb00155.x>.
18. Tomkins A.G. Windows of metamorphic sulfur liberation in the crust: implications for gold deposit genesis. *Geochimica et Cosmochimica Acta*. 2010;74:3246-3259. <https://doi.org/10.1016/j.gca.2010.03.003>.
19. Tomkins A.G., Evans K.A. Separate zones of sulfate and sulfide release from subducted mafic oceanic crust. *Earth and Planetary Science Letters*. 2015;428:73-83. <https://doi.org/10.1016/j.epsl.2015.07.028>.

Информация об авторах / Information about the authors



Скузоватов Сергей Юрьевич,

кандидат геолого-минералогических наук,
заместитель директора по научной работе,
старший научный сотрудник лаборатории геохимии изотопов,
Институт геохимии им. А.П. Виноградова СО РАН,
г. Иркутск, Россия,

✉ skuzovatov@igc.irk.ru

<https://orcid.org/0000-0002-2253-6020>

Sergei Yu. Skuzovatov,

Cand. Sci. (Geol. & Mineral.),
Deputy Director for Research,
Senior Researcher of the Laboratory of Isotope Geochemistry,
A.P. Vinogradov Institute of Geochemistry SB RAS,
Irkutsk, Russia,

✉ skuzovatov@igc.irk.ru

<https://orcid.org/0000-0002-2253-6020>



Тарасова Юлия Игоревна,

кандидат геолого-минералогических наук,
старший научный сотрудник лаборатории геохимии рудообразования
и геохимических методов поисков,
Институт геохимии им. А.П. Виноградова СО РАН,
г. Иркутск, Россия,
старший научный сотрудник департамента рудной геологии,
Институт «Сибирская школа геонаук»,
Иркутский национальный исследовательский технический университет,
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 Laboratory of Geochemistry of Ore Formation
and Geochemical Prospecting Methods,
A.P. Vinogradov Institute of Geochemistry SB RAS,
Irkutsk, Russia,
Senior Researcher of the Ore Geology Department,
Siberian School of Geosciences,
Irkutsk National Research Technical University,
Irkutsk, Russia,
j.tarasova84@yandex.ru
<https://orcid.org/0000-0001-8741-9645>

Вклад авторов / Contribution of the authors

С.Ю. Скузоватов – получение грантовой поддержки, планирование и проведение исследований, подготовка и редактирование материалов статьи.

Ю.И. Тарасова – проведение исследований, подготовка и редактирование материалов статьи.

Sergei Yu. Skuzovатов was responsible for funding acquisition, planning and carrying out the research, manuscript preparation and revision.

Yulia I. Tarasova carried out the research, prepared and edited the manuscript.

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.

Information about the article / Информация о статье

Статья поступила в редакцию 26.02.2024; одобрена после рецензирования 11.03.2024; принята к публикации 22.03.2024.

The article was submitted 26.02.2024; approved after reviewing 11.03.2024; accepted for publication 22.03.2024.

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

Научная статья

УДК 622.276:552.578.2.061.4:004.94

EDN: RVJLFG

DOI: 10.21285/2686-9993-2024-47-1-44-55

Глубокая дифференциация залежей нефти Урало-Поволжья
с использованием факторного анализаР.А. Гилязетдинов^{a,✉}, Л.С. Кулешова^b, В.В. Мухаметшин^c, А.А. Гиззатуллина^d^{a,b,d}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. Цель данного исследования заключалась в представлении алгоритма, созданного с использованием научно-методических основ количественно-качественной обработки геолого-промысловых данных и позволяющего реализовать процедуру глубокой идентификации залежей. Разработанный алгоритм состоит из двух уровней: на начальном этапе производится разделение объектов по тектонико-стратиграфическому признаку, в результате этого формируется ряд мегагрупп объектов, после чего с использованием элементов факторного анализа данных производится их глубокая дифференциация совместно с мониторингом объектов, которые обладают высокой степенью идентичности между собой. Представленный подход к решению задач эффективного группирования залежей является наиболее результативным за счет комплексной и обоснованной оценки образуемых в результате моделирования групп объектов. На примере ряда объектов, приуроченных к терригенным коллекторам девонской и каменноугольной систем Волго-Уральской нефтегазоносной провинции, проведена апробация разработанного алгоритма. Доля верно сгруппированных объектов после двух этапов расчетов составила в среднем 96,8 %, что является высоким результатом. Для качественного и объективного поиска объектов-аналогов получено 18 уравнений, объединяющих между собой на достаточно релевантном уровне достоверности 20 параметров, которые описывают геолого-физические характеристики продуктивных пластов и физико-химические свойства насыщающих их флюидов. На основании результатов использования разработанного алгоритма глубокой идентификации залежей получен ряд актуальных математических зависимостей между различными параметрами, графических распределений объектов в осях главных компонент, в совокупности позволяющих по залежам терригенных коллекторов девонской и каменноугольной систем Волго-Уральской нефтегазоносной провинции эффективно и систематично производить поиск объектов-аналогов. Помимо этого, на основе представленных идентификационных схем можно успешно управлять процессами нефтеизвлечения в пределах микро- и макроуровней распределения объектов в осях главных компонент и формировать перечень общих рекомендаций, способствующих оптимальному освоению ресурсов жидких углеводородов.

Ключевые слова: глубокая идентификация залежей, геолого-статистическое моделирование, тектонико-стратиграфический фактор, факторный анализ, терригенные коллекторы девонской и каменноугольной систем

Для цитирования: Гилязетдинов Р.А., Кулешова Л.С., Мухаметшин В.В., Гиззатуллина А.А. Глубокая дифференциация залежей нефти Урало-Поволжья с использованием факторного анализа // Науки о Земле и недропользование. 2024. Т. 47. № 1. С. 44–55. <https://doi.org/10.21285/2686-9993-2023-47-1-44-55>. EDN: RVJLFG.

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

Original article

Factor analysis-based deep differentiation of oil deposits
in the Ural-Volga regionRuslan A. Gilyazetdinov^{a,✉}, Lyubov S. Kuleshova^b,
Vyacheslav V. Mukhametshin^c, Alina A. Gizzatullina^d^{a,b,d}Institute of Oil and Gas of the Ufa State Petroleum Technological University,
Oktyabrsky Branch, Oktyabrsky, Russia^cUfa State Petroleum Technological University, Ufa, Russia

© Гилязетдинов Р.А., Кулешова Л.С., Мухаметшин В.В., Гиззатуллина А.А., 2024



Abstract. The purpose of the article is to present an algorithm developed on the scientific and methodological foundations of quantitative and qualitative processing of geological and commercial data to implement the procedure for deep identification of deposits. The developed algorithm consists of two levels: the initial stage includes facility identification by tectonic and stratigraphic characteristics resulting in the formation of a number of megagroups of objects. Then they are subjected to deep differentiation using the elements of data factor analysis, which is carried out together with the monitoring of the highly identical objects. The presented approach to solving the problems of field effective grouping is the most effective due to a comprehensive and reasonable assessment of the groups of facilities formed as a result of modeling. The developed algorithm was tested on example of a number of fields associated with terrigenous reservoirs of the Devonian and carboniferous systems of the Volga-Ural oil and gas province. After two calculation stages the percentage of correctly grouped objects averaged 96.8 %, which is a high result. To make the search for analogous objects qualitative and objective eighteen equations have been obtained that combine twenty parameters describing the geological and physical characteristics of productive formations as well as the physico-chemical properties of the fluids saturating them at the sufficient level of reliability. Based on the results of using the developed algorithm for deep identification of deposits, the authors obtained a number of relevant mathematical dependencies between various parameters, graphical distributions of objects in the axes of the main components, which all together enable efficient and systematic search for analogous objects in the deposits of terrigenous reservoirs of the Devonian and carboniferous systems of the Volga-Ural oil and gas province. Besides, the presented identification diagrams enable successful management of the processes of oil recovery within the micro- and macro-levels of facility distribution in the axes of the main components. They also allow to form a list of general recommendations that will contribute to the optimal development of liquid hydrocarbon resources.

Keywords: deep identification of deposits, geological and statistical modeling, tectonic and stratigraphic factor, factor analysis, terrigenous reservoirs of the Devonian and carboniferous systems

For citation: Gilyazetdinov R.A., Kuleshova L.S., Mukhametshin V.V., Gizzatullina A.A. Factor analysis-based deep differentiation of oil deposits in the Ural-Volga region. *Nauki o Zemle i nedropol'zovanie = Earth sciences and subsoil use*. 2024;47(1):44-55. (In Russ.). <https://doi.org/10.21285/2686-9993-2024-47-1-44-55>. EDN: RVJLFG.

Введение

Известно, что дифференциация и группирование объектов добычи нефти позволяют снизить риски принятия ошибочных решений при регулировании процесса эксплуатации залежей с целью повышения эффективности процесса нефтеизвлечения на основе использования метода аналогий. При этом важно провести идентификацию объектов настолько глубоко, насколько позволяет современный уровень определения параметров идентификации [1]. В то же время желательно, чтобы эти параметры характеризовали эффективность протекания процесса разработки залежей и выделялись одинаково по всем рассматриваемым объектам [2–4].

Ранее была проведена идентификация объектов Волго-Уральской нефтегазоносной провинции в терригенных коллекторах, приуроченных: в тектоническом отношении – к Верхнекамской (ВКВ) и Благовещенской (БВ) впадинам, Башкирскому (БС) и Южно-Татарскому (ЮТС) сводам, Бирской (БИС) седловине; в стратиграфическом отношении – к воробьевскому (Вр), ардатовскому (Ар), муллинскому (Мл), пашийскому (Пш), кыновскому (Кн) горизонтам, орловскому надгоризонту (Ор), токатинским (Тк) и тимановским (Тм) слоям девонской системы, косвинскому (К),

радаевскому (Р), бобриковскому (Б), тульскому (Т) горизонтам каменноугольной системы, а также кунгурскому (Кг), сакмарскому (Ск), ассельскому (Асс) и артинскому (Арт) ярусам пермской системы [5, 6]¹.

Материалы и методы исследования

Идентификация проводилась по параметрам, представленным в табл. 1.

На первом этапе с использованием дискриминантного анализа была проведена проверка результатов исследований, представленных в работах [7, 8], о превалирующем влиянии тектонико-стратиграфического фактора на формирование особенностей геологического строения объектов добычи нефти [9–14].

Расчеты показали, что около 80 % рассматриваемых объектов группируются по рассматриваемым параметрам в соответствии с их тектонико-стратиграфической приуроченностью. Однако 20 % в выделенных группах – это объекты других тектонико-стратиграфических элементов. Кроме того, разброс объектов разработки в осях канонических дискриминантных функций весьма значителен, что может привести к принятию ошибочных решений при использовании метода аналогий [15].

¹ Лобусев А.В., Лобусев М.А., Назарова Л.Н. Моделирование разведки и разработки виртуального нефтегазового месторождения: учеб. пособие. М.: Недра-Бизнесцентр, 2008. 125 с.



Таблица 1. Параметры, используемые для моделирования

Table 1. Modeling parameters

Номер параметра	Обозначение, расшифровка, единица измерения
1	$H_{зал}$, глубина залегания пласта, м
2	$H_{общ}$, общая толщина пласта, м
3	H_z , эффективная нефтенасыщенная толщина пласта, м
4	H_n , средняя толщина нефтенасыщенных пропластков, м
5	m_z , коэффициент пористости, д. ед.
6	K_n , коэффициент нефтенасыщенности, д. ед.
7	$K_{прон}$, коэффициент проницаемости, мкм ²
8	K_n , коэффициент песчаности, д. ед.
9	K_p , коэффициент расчлененности
10	$t_{пл}$, начальная пластовая температура, °С
11	$P_{пл}$, начальное пластовое давление, МПа
12	μ_n , вязкость нефти в пластовых условиях, мПа·с
13	ρ'_n , плотность нефти в пластовых условиях, т/м ³
14	ρ_n , плотность нефти в поверхностных условиях, т/м ³
15	β , объемный коэффициент нефти
16	$P_{нас}$, давление насыщения нефти газом, МПа
17	G , газосодержание пластовой нефти, м ³ /т
18	μ_v , вязкость воды в пластовых условиях, мПа·с
19	ρ'_v , плотность воды в поверхностных условиях, т/м ³
20	M , общая минерализация воды, г/л

В связи с этим было принято решение провести глубокую идентификацию объектов в пределах каждой из полученных групп (четыре группы в девонских отложениях и пять групп в каменноугольных) с использованием метода главных компонент.

На рис. 1 представлены девонские объекты в терригенных коллекторах Южно-Татарского свода, а также отдельные объекты кыновского,

пашийского, муллинского и ардатовского горизонтов Башкирского свода, Бирской седловины и Благовещенской впадины, составляющие четвертую группу терригенных коллекторов девонской системы. В осях главных компонент Z_1 и Z_2 выделено восемь групп объектов весьма близких друг другу по значениям параметров, используемых для характеристики особенностей геологического строения залежей [16–19].

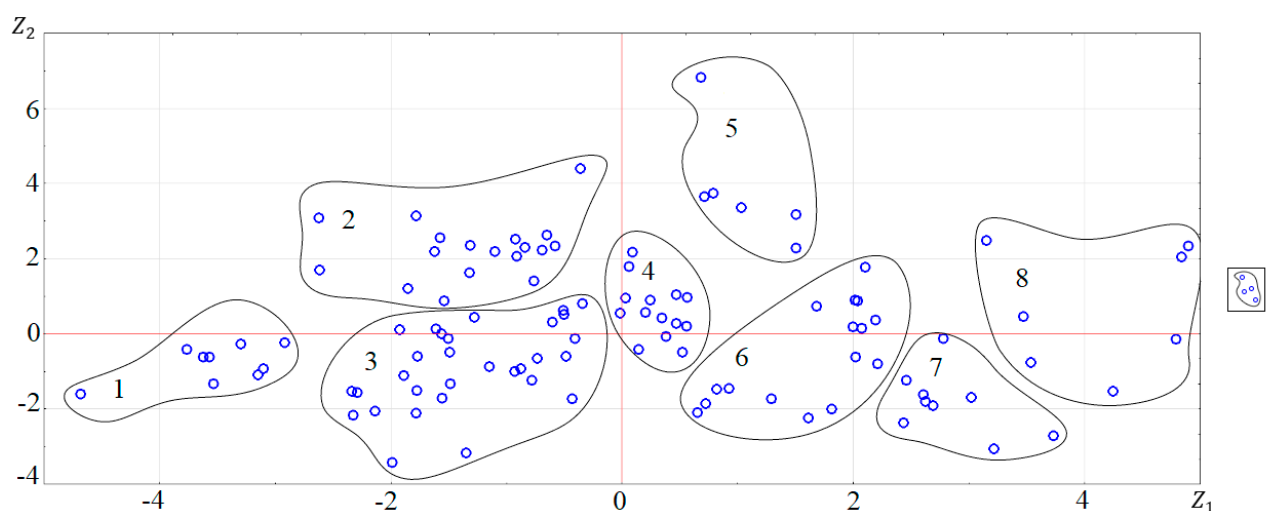


Рис. 1. Распределение залежей четвертой группы объектов в терригенных коллекторах девонской системы:
I – зона сосредоточения относительно однородных групп объектов
Fig. 1. Distribution of deposits of the 4th group of objects in the Devonian system terrigenous reservoirs:
I – concentration area of relatively homogeneous groups of objects

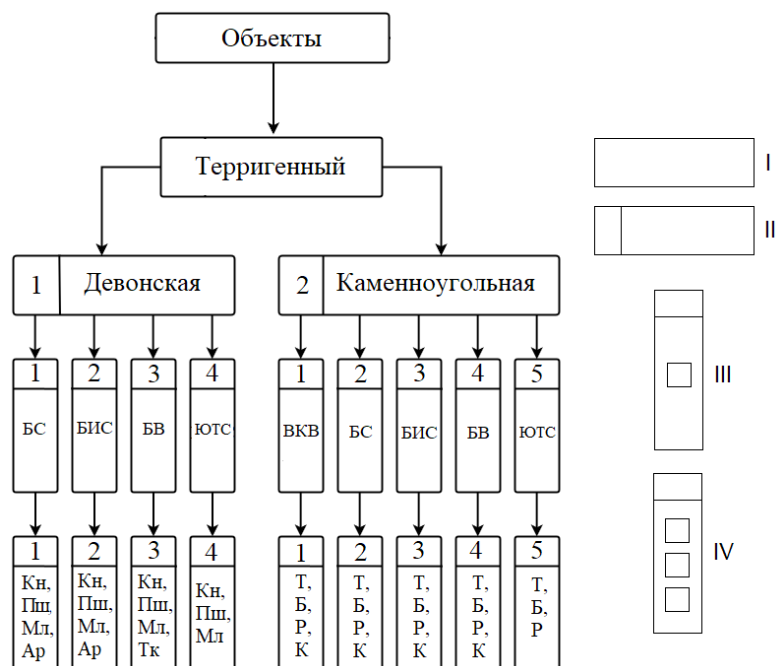


Рис. 2. Схема первичной дифференциации объектов добычи нефти Волго-Уральской нефтегазоносной провинции:

*I – тип коллектора; II – стратиграфическая система; III – индекс тектонического элемента;
IV – индекс стратиграфической единицы (горизонт, ярус)*

Fig. 2. Diagram of primary differentiation of oil production sites in the Volga-Ural oil and gas province:

*I – reservoir type; II – stratigraphic system; III – index of a tectonic element;
IV – index of a stratigraphic unit (horizon, stage)*

Аналогичная процедура была проведена по всем выделенным группам объектов, представленных на рис. 2. Эти группы в дальнейшем будем называть мегагруппами. Далее был проведен дискриминантный анализ для вновь созданных групп по значениям главных компонент рассматриваемых объектов.

Результаты исследования и их обсуждение

Из табл. 2 видно, что доля верно сгруппированных объектов изменяется от 85,5 до 100 %, составляя в среднем 96,8 %, что является весьма высоким показателем степени иден-

тификации объектов, и данное деление можно достаточно эффективно использовать при применении метода аналогий для решения задач разработки месторождений Волго-Уральской нефтегазоносной провинции.

Исходя из полученных результатов, на рис. 2–4 представлены схемы идентификации залежей Волго-Уральской нефтегазоносной провинции для решения вопросов управления разработкой с целью увеличения отдачи активов недропользователей. При глубокой идентификации в осях главных компонент объектов девяти групп выделено, как видно из схем (см. рис. 2–4), 44 группы объектов.

Таблица 2. Значения процента верно сгруппированных объектов с использованием метода главных компонент и дискриминантного анализа
Table 2. Percentage values of correctly grouped objects using the principal component method and discriminant analysis

Тип коллектора	Система	Номер мегагруппы из таблиц	Процент верно сгруппированных объектов
Терригенный	Девонская	1	100
		2	100
		3	91,8
		4	93,9
	Каменноугольная	1	100
		2	94,4
		3	85,5
		4	96,4
		5	88,1

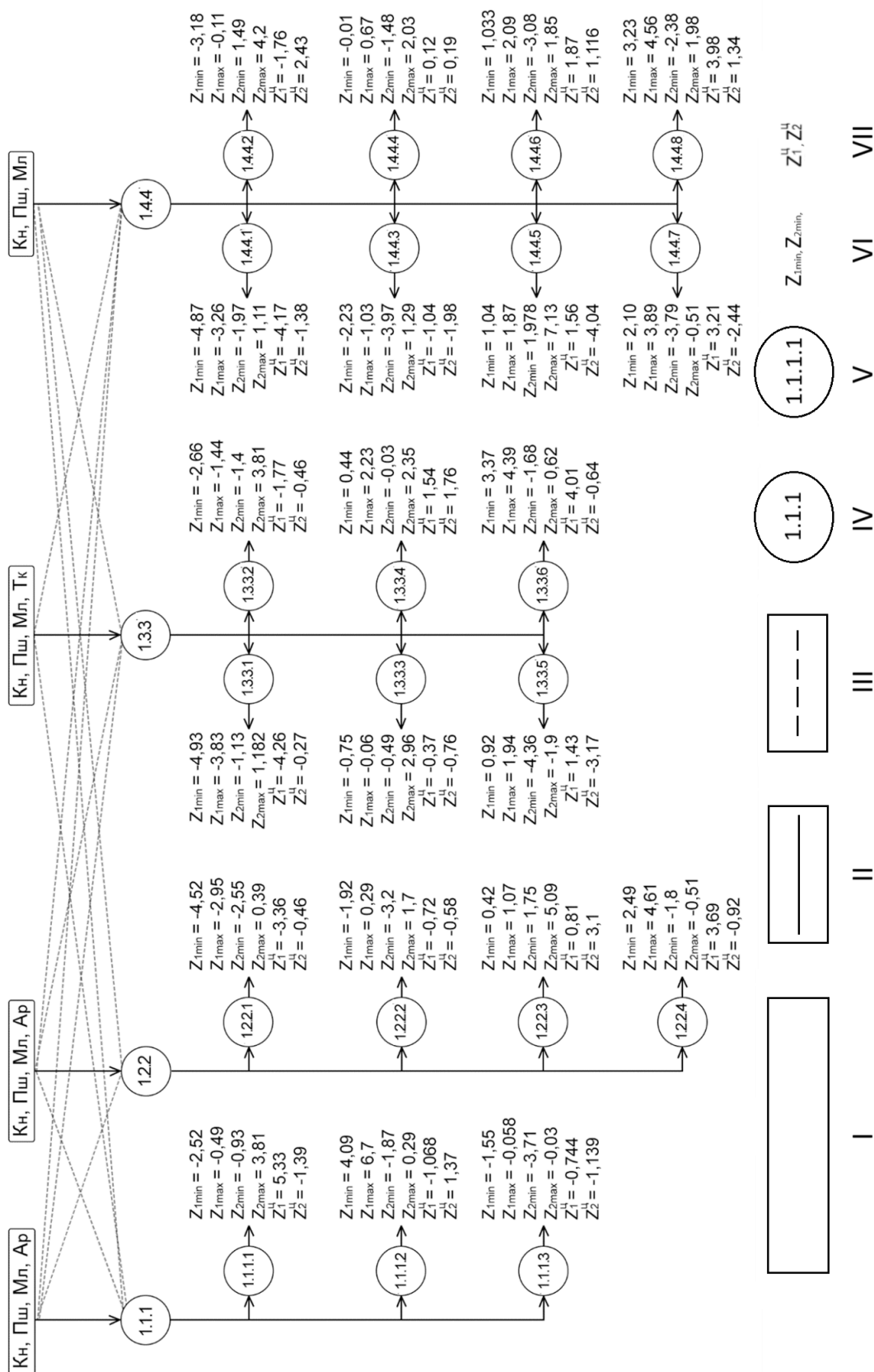


Рис. 3. Схема глубокой дифференциации объектов добычи нефти Волго-Уральской нефтегазоносной провинции (терригенный, девонская):
I – индекс стратиграфической единицы (горизонт, ярус); II – связь с основными объектами групп; III – связь со второстепенными объектами основных групп;
IV – номера выделенных групп; V – номера групп, выделенных при глубокой идентификации; VI – минимальное и максимальное значение переших двух
главных компонент для группы; VII – значения переших двух главных компонент в центроидах групп

Fig. 3. Diagram of oil production facility deep differentiation in the Volga-Ural oil and gas province (terrigenous, Devonian):
I – index of the stratigraphic unit (horizon, stage); II – connection with the main objects of the groups; III – connection with the secondary objects of the main groups;
IV – numbers of selected groups; V – numbers of groups determined by deep identification; VI – minimum and maximum values of the first two
main components for the group; VII – values of the first two main components in group centroids

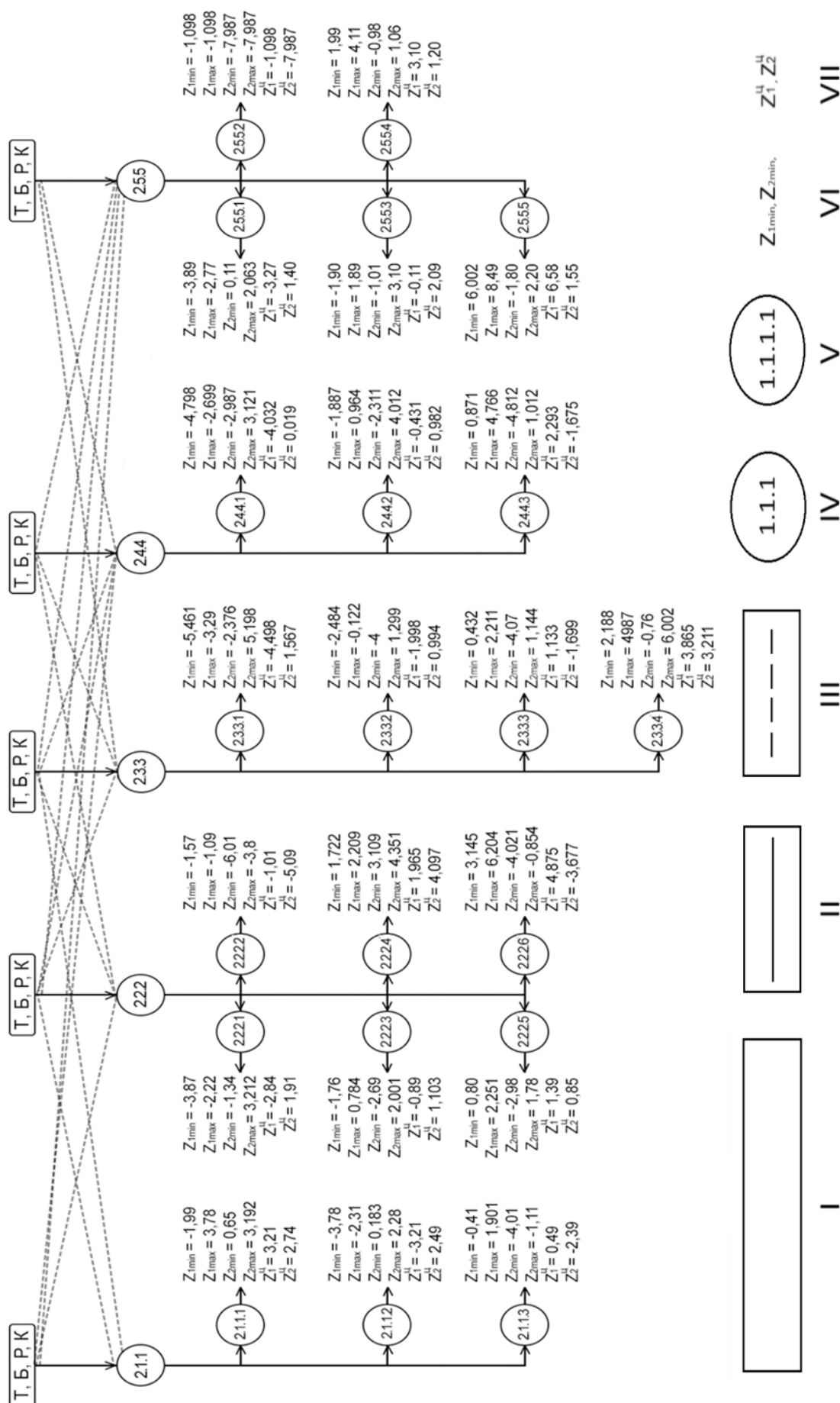


Рис. 4. Схема глубокой дифференциации объектов добычи нефти Волго-Уральской нефтегазоносной провинции (терригенный, карбонатный)
Условные обозначения I–VII аналогичны обозначениям, представленным на рис. 3

Fig. 4. Diagram of oil production facility deep differentiation in the Volga-Ural oil and gas province (terrigenous, carboniferous)
Symbols I–VII are similar to the ones in Fig. 3



Для успешного поиска объектов-аналогов для залежей, вводимых в разработку, на схемах приведены интервалы применения значений главных компонент отдельно по

группам и значения их в соответствующих центроидах [20]. Сами значения главных компонент можно рассчитать по группам по формулам (1)–(18):

– для группы 1.1.1:

$$Z_1 = 0,418H_{\text{зал}} + 0,182H_{\text{общ}} + 0,226H_{\text{э}} + 0,483H_{\text{п}} + 0,337m_{\text{г}} - 0,027K_{\text{н}} + 0,011K_{\text{прон}} + 0,104K_{\text{п}} - 0,038K_{\text{р}} + 0,552t_{\text{пл}} + 0,408P_{\text{пл}} + 0,953\mu_{\text{н}} + 0,884\rho_{\text{н}} + 0,900p'_{\text{н}} - 0,699\beta - 0,561P_{\text{нас}} - 0,699G + 0,698\mu_{\text{б}} + 0,129p'_{\text{б}} - 0,329M; \quad (1)$$

$$Z_2 = 0,614H_{\text{зал}} + 0,182H_{\text{общ}} + 0,226H_{\text{э}} + 0,483H_{\text{п}} + 0,337m_{\text{г}} + 0,431K_{\text{н}} - 0,570K_{\text{прон}} - 0,843K_{\text{п}} + 0,759K_{\text{р}} + 0,391t_{\text{пл}} + 0,083P_{\text{пл}} - 0,086\mu_{\text{н}} - 0,217\rho_{\text{н}} - 0,168p'_{\text{н}} + 0,145\beta - 0,464P_{\text{нас}} + 0,124G - 0,039\mu_{\text{б}} + 0,533p'_{\text{б}} + 0,415M; \quad (2)$$

– для группы 1.2.2:

$$Z_1 = -0,685H_{\text{зал}} + 0,301H_{\text{общ}} - 0,023H_{\text{э}} + 0,098H_{\text{п}} - 0,415m_{\text{г}} + 0,561K_{\text{н}} - 0,116K_{\text{прон}} + 0,118K_{\text{п}} - 0,255K_{\text{р}} + 0,004t_{\text{пл}} - 0,659P_{\text{пл}} - 0,787\mu_{\text{н}} - 0,849\rho_{\text{н}} - 0,888p'_{\text{н}} + 0,760\beta + 0,505P_{\text{нас}} + 0,848G + 0,401\mu_{\text{б}} + 0,552p'_{\text{б}} + 0,172M; \quad (3)$$

$$Z_2 = -0,114H_{\text{зал}} + 0,738H_{\text{общ}} + 0,845H_{\text{э}} + 0,512H_{\text{п}} + 0,290m_{\text{г}} + 0,210K_{\text{н}} + 0,284K_{\text{прон}} - 0,276K_{\text{п}} + 0,749K_{\text{р}} + 0,761t_{\text{пл}} + 0,072P_{\text{пл}} + 0,066\mu_{\text{н}} - 0,124\rho_{\text{н}} + 0,154p'_{\text{н}} - 0,074\beta - 0,408P_{\text{нас}} - 0,076G + 0,083\mu_{\text{б}} + 0,402p'_{\text{б}} + 0,742M; \quad (4)$$

– для группы 1.3.3:

$$Z_1 = 0,783H_{\text{зал}} + 0,329H_{\text{общ}} + 0,444H_{\text{э}} + 0,431H_{\text{п}} - 0,164m_{\text{г}} + 0,426K_{\text{н}} - 0,400K_{\text{прон}} + 0,404K_{\text{п}} + 0,017K_{\text{р}} + 0,759t_{\text{пл}} + 0,687P_{\text{пл}} - 0,883\mu_{\text{н}} - 0,780\rho_{\text{н}} - 0,665p'_{\text{н}} + 0,914\beta - 0,300P_{\text{нас}} + 0,909G - 0,424\mu_{\text{б}} - 0,515p'_{\text{б}} - 0,593M; \quad (5)$$

$$Z_2 = 0,398H_{\text{зал}} - 0,436H_{\text{общ}} - 0,753H_{\text{э}} - 0,281H_{\text{п}} - 0,489m_{\text{г}} + 0,131K_{\text{н}} - 0,264K_{\text{прон}} - 0,141K_{\text{п}} - 0,517K_{\text{р}} + 0,435t_{\text{пл}} + 0,370P_{\text{пл}} - 0,082\mu_{\text{н}} + 0,017\rho_{\text{н}} + 0,161p'_{\text{н}} - 0,143\beta - 0,222P_{\text{нас}} - 0,114G - 0,100\mu_{\text{б}} + 0,199p'_{\text{б}} + 0,329M; \quad (6)$$

– для группы 1.4.4:

$$Z_1 = 0,033H_{\text{зал}} + 0,372H_{\text{общ}} + 0,609H_{\text{э}} + 0,555H_{\text{п}} + 0,283m_{\text{г}} + 0,081K_{\text{н}} + 0,204K_{\text{прон}} - 0,182K_{\text{п}} + 0,107K_{\text{р}} + 0,303t_{\text{пл}} + 0,142P_{\text{пл}} - 0,692\mu_{\text{н}} - 0,888\rho_{\text{н}} - 0,845p'_{\text{н}} + 0,860\beta + 0,713P_{\text{нас}} + 0,731G - 0,076\mu_{\text{б}} - 0,071p'_{\text{б}} + 0,241M; \quad (7)$$

$$Z_2 = 0,907H_{\text{зал}} - 0,251H_{\text{общ}} + 0,008H_{\text{э}} + 0,077H_{\text{п}} - 0,533m_{\text{г}} + 0,055K_{\text{н}} - 0,353K_{\text{прон}} + 0,251K_{\text{п}} - 0,013K_{\text{р}} + 0,841t_{\text{пл}} + 0,849P_{\text{пл}} - 0,104\mu_{\text{н}} - 0,002\rho_{\text{н}} + 0,172p'_{\text{н}} + 0,049\beta + 0,085P_{\text{нас}} - 0,171G - 0,295\mu_{\text{б}} - 0,302p'_{\text{б}} - 0,191M; \quad (8)$$

– для группы 2.1.1:

$$Z_1 = 0,572H_{\text{зал}} - 0,195H_{\text{общ}} + 0,507H_{\text{э}} + 0,279H_{\text{п}} - 0,300m_{\text{г}} + 0,252K_{\text{н}} + 0,804K_{\text{прон}} - 0,294K_{\text{п}} + 0,540K_{\text{р}} + 0,515t_{\text{пл}} + 0,163P_{\text{пл}} + 0,496\mu_{\text{н}} + 0,715\rho_{\text{н}} + 0,197p'_{\text{н}} - 0,728\beta + 0,544P_{\text{нас}} - 0,730G + 0,873\mu_{\text{б}} + 0,762p'_{\text{б}} - 0,936M; \quad (9)$$

$$Z_2 = 0,201H_{\text{зал}} + 0,477H_{\text{общ}} + 0,668H_{\text{э}} + 0,566H_{\text{п}} + 0,386m_{\text{г}} + 0,202K_{\text{н}} + 0,429K_{\text{прон}} - 0,393K_{\text{п}} + 0,469K_{\text{р}} + 0,301t_{\text{пл}} - 0,888P_{\text{пл}} - 0,783\mu_{\text{н}} - 0,444\rho_{\text{н}} - 0,851p'_{\text{н}} + 0,392\beta + 0,426P_{\text{нас}} + 0,535G - 0,460\mu_{\text{б}} + 0,516p'_{\text{б}} - 0,188M; \quad (10)$$



– для группы 2.2.2:

$$\begin{aligned} Z_1 = & 0,505H_{\text{зал}} - 0,100H_{\text{общ}} - 0,131H_{\text{э}} - 0,104H_{\text{п}} - 0,485m_{\text{г}} - \\ & - 0,123K_{\text{н}} - 0,354K_{\text{прон}} + 0,268K_{\text{п}} - 0,072K_{\text{р}} - 0,082t_{\text{пл}} + 0,692P_{\text{пл}} + \\ & + 0,547\mu_{\text{н}} + 0,528\rho_{\text{н}} + 0,411p'_{\text{н}} - 0,697\beta - 0,735P_{\text{нас}} - 0,822G - 0,405\mu_{\text{в}} - \\ & - 0,669p'_{\text{в}} - 0,272M; \end{aligned} \quad (11)$$

$$\begin{aligned} Z_2 = & 0,672H_{\text{зал}} - 0,562H_{\text{общ}} - 0,431H_{\text{э}} - 0,298H_{\text{п}} - 0,435m_{\text{г}} + 0,084K_{\text{н}} - \\ & - 0,751K_{\text{прон}} + 0,253K_{\text{п}} - 0,583K_{\text{р}} + 0,105t_{\text{пл}} + 0,439P_{\text{пл}} - 0,576\mu_{\text{н}} - 0,721\rho_{\text{н}} - \\ & - 0,537p'_{\text{н}} + 0,303\beta + 0,180P_{\text{нас}} - 0,101G - 0,506\mu_{\text{в}} + 0,496p'_{\text{в}} + 0,195M; \end{aligned} \quad (12)$$

– для группы 2.3.3:

$$\begin{aligned} Z_1 = & 0,380H_{\text{зал}} - 0,264H_{\text{общ}} - 0,710H_{\text{э}} - 0,587H_{\text{п}} - 0,415m_{\text{г}} - 0,651K_{\text{н}} - \\ & - 0,586K_{\text{прон}} + 0,168K_{\text{п}} - 0,178K_{\text{р}} - 0,134t_{\text{пл}} + 0,155P_{\text{пл}} + 0,677\mu_{\text{н}} + 0,357\rho_{\text{н}} + \\ & + 0,443p'_{\text{н}} - 0,850\beta - 0,098P_{\text{нас}} - 0,863G + 0,506\mu_{\text{в}} + 0,676p'_{\text{в}} + 0,289M; \end{aligned} \quad (13)$$

$$\begin{aligned} Z_2 = & -0,454H_{\text{зал}} + 0,682H_{\text{общ}} + 0,111H_{\text{э}} - 0,102H_{\text{п}} + 0,595m_{\text{г}} - 0,006K_{\text{н}} + \\ & + 0,357K_{\text{прон}} - 0,039K_{\text{п}} + 0,567K_{\text{р}} - 0,258t_{\text{пл}} - 0,268P_{\text{пл}} + 0,583\mu_{\text{н}} + 0,692\rho_{\text{н}} + \\ & + 0,658p'_{\text{н}} - 0,079\beta + 0,482P_{\text{нас}} - 0,129G - 0,186\mu_{\text{в}} - 0,111p'_{\text{в}} + 0,356M; \end{aligned} \quad (14)$$

– для группы 2.4.4:

$$\begin{aligned} Z_1 = & 0,766H_{\text{зал}} + 0,250H_{\text{общ}} - 0,243H_{\text{э}} - 0,376H_{\text{п}} - 0,678m_{\text{г}} + 0,260K_{\text{н}} - \\ & - 0,765K_{\text{прон}} - 0,256K_{\text{п}} + 0,229K_{\text{р}} + 0,785t_{\text{пл}} + 0,726P_{\text{пл}} - 0,739\mu_{\text{н}} - 0,811\rho_{\text{н}} - \\ & - 0,548p'_{\text{н}} + 0,853\beta + 0,383P_{\text{нас}} + 0,828G - 0,334\mu_{\text{в}} + 0,023p'_{\text{в}} + 0,510M; \end{aligned} \quad (15)$$

$$\begin{aligned} Z_2 = & -0,257H_{\text{зал}} + 0,060H_{\text{общ}} + 0,741H_{\text{э}} + 0,752H_{\text{п}} + 0,472m_{\text{г}} + 0,414K_{\text{н}} + \\ & + 0,458K_{\text{прон}} + 0,058K_{\text{п}} + 0,125K_{\text{р}} - 0,389t_{\text{пл}} - 0,349P_{\text{пл}} - 0,590\mu_{\text{н}} - 0,446\rho_{\text{н}} - \\ & - 0,573p'_{\text{н}} + 0,281\beta + 0,352P_{\text{нас}} + 0,439G - 0,326\mu_{\text{в}} - 0,559p'_{\text{в}} - 0,369M; \end{aligned} \quad (16)$$

– для группы 2.5.5:

$$\begin{aligned} Z_1 = & 0,623H_{\text{зал}} - 0,078H_{\text{общ}} - 0,075H_{\text{э}} + 0,008H_{\text{п}} - 0,410m_{\text{г}} - 0,062K_{\text{н}} - \\ & - 0,213K_{\text{прон}} + 0,041K_{\text{п}} - 0,116K_{\text{р}} + 0,752t_{\text{пл}} + 0,794P_{\text{пл}} - 0,669\mu_{\text{н}} - 0,865\rho_{\text{н}} - \\ & - 0,521p'_{\text{н}} + 0,897\beta + 0,832P_{\text{нас}} + 0,856G - 0,167\mu_{\text{в}} + 0,281p'_{\text{в}} + 0,347M; \end{aligned} \quad (17)$$

$$\begin{aligned} Z_2 = & 0,235H_{\text{зал}} - 0,854H_{\text{общ}} - 0,944H_{\text{э}} - 0,805H_{\text{п}} - 0,496m_{\text{г}} - 0,489K_{\text{н}} - \\ & - 0,571K_{\text{прон}} + 0,138K_{\text{п}} - 0,874K_{\text{р}} + 0,147t_{\text{пл}} + 0,167P_{\text{пл}} + 0,254\mu_{\text{н}} + 0,201\rho_{\text{н}} + \\ & + 0,542p'_{\text{н}} - 0,036\beta - 0,163P_{\text{нас}} - 0,136G - 0,384\mu_{\text{в}} - 0,431p'_{\text{в}} + 0,019M. \end{aligned} \quad (18)$$

Заключение

Таким образом, на основании проведенных исследований создан алгоритм глубокой идентификации объектов в терригенных коллекторах Волго-Уральской нефтегазоносной провинции, основанный на использовании достаточной по объему количественно-качественной информации, позволяющей на вы-

соком уровне использовать метод аналогий при решении промысловых задач. Данный алгоритм существенно повышает степень идентификации объектов, позволяет с высокой степенью точности определить объекты-аналоги, существенно снижает зоны неопределенности и риски принятия неверных управляющих решений.

Список источников

1. Максимов С.П., Кирова В.А., Клубов В.А., Нечитайло С.К., Петропавловский В.В., Абрикосов И.Х. [и др.]. Геология нефтяных и газовых месторождений Волго-Уральской нефтегазоносной провинции. М.: Недра-Бизнесцентр, 1970. 807 с.
2. 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.
3. Абызбаев И.И., Андреев В.Е. Прогнозирование эффективности физико-химического воздействия на пласт // Нефтегазовое дело. 2005. № 3. С. 167–176. EDN: JYAJOX.



4. Кудряшов С.И., Белкина Е.Ю., Хасанов М.М., Павлов В.А., Тарасов П.А. Количественные методы использования аналогов в задачах разведки и разработки месторождений // Нефтяное хозяйство. 2015. № 4. С. 43–47. EDN: TQNUUB.
5. Лозин Е.В. Геология и нефтеносность Башкортостана. Уфа: Изд-во БашНИПИнефть, 2015. 704 с.
6. Мухаметшин В.Ш., Хакимзянов И.Н. Особенности группирования низкопродуктивных залежей нефти в карбонатных коллекторах для рационального использования ресурсов в пределах Урало-Поволжья // Записки Горного института. 2021. Т. 252. С. 896–907. <https://doi.org/10.31897/PMI.2021.6.11>. EDN: VEKSXG.
7. Мухаметшин В.В. Повышение эффективности управления разработкой залежей Западно-Сибирской нефтегазоносной провинции на основе дифференциации и группирования // Геология и геофизика. 2021. Т. 62. № 12. С. 1672–1685. <https://doi.org/10.15372/GiG2021102>. EDN: WGRDPF.
8. Мухаметшин В.Ш., Кулешова Л.С., Сафиуллина А.Р. Группирование и выделение залежей нефти в карбонатных коллекторах по продуктивности на стадии проведения геолого-разведочных работ // Известия Томского политехнического университета. Инжиниринг георесурсов. 2021. Т. 332. № 12. С. 43–51. <https://doi.org/10.18799/24131830/2021/12/2982>. EDN: QPNFLY.
9. 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. 12013. <https://doi.org/10.1088/1755-1315/579/1/012013>.
10. 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. 12080. <https://doi.org/10.1088/1742-6596/1753/1/012080>.
11. Tavana M., Soltanifar M., Santos-Arteaga F.J. Analytical hierarchy process: revolution and evolution // Annals of Operations Research. 2023. Vol. 326. P. 879–907. <https://doi.org/10.1007/s10479-021-04432-2>.
12. Кулешова Л.С., Мухаметшин В.В. Особенности идентификации залежей в условиях различных нефтегазоносных регионов // Геология, геофизика и разработка нефтяных и газовых месторождений. 2019. № 5. С. 61–65. [https://doi.org/10.30713/2413-5011-2019-5\(329\)-61-65](https://doi.org/10.30713/2413-5011-2019-5(329)-61-65). EDN: ZHEGNV.
13. Хасанов М.М., Мухамедшин Р.К., Хатмуллин И.Ф. Компьютерные технологии решения многокритериальных задач мониторинга разработки нефтяных месторождений // Вестник инжинирингового центра ЮКОС. 2001. № 2. С. 26–29.
14. Мухаметшин В.В., Кулешова Л.С. О снижении уровня неопределенности при управлении заводнением залежей с трудноизвлекаемыми запасами // Известия Томского политехнического университета. Инжиниринг георесурсов. 2020. Т. 331. № 5. С. 140–146. <https://doi.org/10.18799/24131830/2020/5/2644>. EDN: HPSFVH.
15. Wen X., Yang J., Geng S., Li K. Study on new method for evaluating reservoir formation pressure by wellhead pressure // IOP Conference Series: Earth and Environmental Science. 2019. Vol. 384. P. 12037. <https://doi.org/10.1088/1755-1315/384/1/012037>.
16. Malyarenko A.M., Bogdan V.A., Blinov S.A., Kotenev Yu.A., Mukhametshin V.Sh., Kotenev M.Yu. Improving the reliability of determining physical properties of heterogeneous clay reservoir rocks using a set of techniques // Journal of Physics: Conference Series. 2021. Vol. 1753. P. 12074. <https://doi.org/10.1088/1742-6596/1753/1/012074>.
17. Gheorghiu S.A., Popescu C. Quantifying economic uncertainties and risks in the oil and gas industry // Recent Applications of Financial Risk Modelling and Portfolio Management / eds T. Škrinjaric, M. Čizmešija, B. Christiansen. 2021. P. 154–184. <https://doi.org/10.4018/978-1-7998-5083-0.ch008>.
18. Симоненко Е.П., Долгирев С.С. Статистический метод построения зависимости коэффициентов насыщенности горных пород нефтяных и газовых залежей от абсолютной глубины и коллекторских свойств // Научно-технический вестник «Каротажник». 2023. № 4. С. 87–100. EDN: EJSWBL.
19. Грищенко В.А., Рабаев Р.У., Асылгареев И.Н., Мухаметшин В.Ш., Якупов Р.Ф. Методический подход к определению оптимальных геолого-технологических характеристик при планировании ГРП на многопластовых объектах // SOCAR Proceedings. 2021. № 2. С. 182–191. <https://doi.org/10.5510/OGP2021SI200587>.
20. Мухаметшин В.Ш. Управление заводнением залежей нефти в карбонатных коллекторах // SOCAR Proceedings. 2022. № 1. С. 37–43. <https://doi.org/10.5510/OGP2022SI100643>.

References

1. Maksimov S.P., Kirova V.A., Klubov V.A., Nechitailo S.K., Petropavlovskii V.V., Abrikosov I.Kh., et al. *Geology of oil and gas fields of the Volga-Ural oil and gas province*. Moscow: Nedra-Biznestsentr; 1970. 807 p. (In Russ.).
2. 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.
3. Abyzbaev I.I., Andreev V.E. Forecasting effectiveness of reservoir physical and chemical stimulation. *Neftgazovoe delo = Petroleum Engineering*. 2005;3:167-176. (In Russ.). EDN: JYAJOX.
4. Kudryashov S.I., Belkina E.Yu., Khasanov M.M., Pavlov V.A., Tarasov P.A. Quantitative approach of using of analogs in exploration and field development. *Neftyanoe khozyaistvo = Oil Industry*. 2015;4:43-47. (In Russ.). EDN: TQNUUB.
5. Lozin E.V. *Geology and oil content of Bashkortostan*. Ufa: RN-BashNIPIneft; 2015. 704 p. (In Russ.).
6. Mukhametshin V.Sh., Khakimzyanov I.N. Features of grouping low-productive oil deposits in carbonate reservoirs for the rational use of resources within the Ural-Volga region. *Zapiski Gornogo instituta = Journal of Mining Institute*. 2021;252:896-907. (In Russ.). <https://doi.org/10.31897/PMI.2021.6.11>. EDN: VEKSXG.



7. Mukhametshin V.V. Improving the efficiency of managing the development of deposits of the West Siberian oil and gas province on the basis of differentiation and grouping. *Geologiya i Geofizika = Russian Geology and Geophysics*. 2021;62(12):1672-1685. (In Russ.). <https://doi.org/10.15372/GiG2021102>. EDN: WGRDPF.
8. Mukhametshin V.Sh., Kuleshova L.S., Safiullina A.R. Grouping and distinguishing of oil deposits in carbonate reservoirs by productivity at the stage of geological exploration. *Izvestiya Tomskogo politekhnicheskogo universiteta. Inzhiniring georesursov = Bulletin of the Tomsk Polytechnic University. Geo Assets Engineering*. 2021;332(12):43-51. (In Russ.). <https://doi.org/10.18799/24131830/2021/12/2982>. EDN: QPNFLY.
9. 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;579:12013. <https://doi.org/10.1088/1755-1315/579/1/012013>.
10. 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;1753:12080. <https://doi.org/10.1088/1742-6596/1753/1/012080>.
11. Tavana M., Soltanifar M., Santos-Arteaga F.J. Analytical hierarchy process: revolution and evolution. *Annals of Operations Research*. 2023;326:879–907. <https://doi.org/10.1007/s10479-021-04432-2>.
12. Kuleshova L.S., Mukhametshin V.V. Deposits identification peculiarities in the regions' various oil and gas-bearing conditions. *Geologiya, geofizika i razrabotka neftyanykh i gazovykh mestorozhdenii = Geology, geophysics and development of oil and gas fields*. 2019;5:61-65. (In Russ.). [https://doi.org/10.30713/2413-5011-2019-5\(329\)-61-65](https://doi.org/10.30713/2413-5011-2019-5(329)-61-65). EDN: ZHEGNV.
13. Khasanov M.M., Mukhametshin R.K., Khatmullin I.F. Computer technologies for solving multi-criteria problems of oil field development monitoring. *Vestnik inzhiniringovogo tsentra YUKOS*. 2001;2:26-29. (In Russ.).
14. Mukhametshin V.V., Kuleshova L.S. On uncertainty level reduction in managing waterflooding of the deposits with hard to extract reserves. *Izvestiya Tomskogo politekhnicheskogo universiteta. Inzhiniring georesursov = Bulletin of the Tomsk Polytechnic University. Geo Assets Engineering*. 2020;331(5):140-146. (In Russ.). <https://doi.org/10.18799/24131830/2020/5/2644>. EDN: HPSFVH.
15. Wen X., Yang J., Geng S., Li K. Study on a new method for evaluating reservoir formation pressure by well-head pressure. *IOP Conference Series: Earth and Environmental Science*. 2019;384:12037. <https://doi.org/10.1088/1755-1315/384/1/012037>.
16. Malyarenko A.M., Bogdan V.A., Blinov S.A., Kotenev Yu.A., Mukhametshin V.Sh., Kotenev M.Yu. Improving the reliability of determining physical properties of heterogeneous clay reservoir rocks using a set of techniques. *Journal of Physics: Conference Series*. 2021;1753:12074. <https://doi.org/10.1088/1742-6596/1753/1/012074>.
17. Gheorghiu S.A., Popescu C. Quantifying economic uncertainties and risks in the oil and gas industry. In: Škrinjaric T., Čizmešija M., Christiansen B. (eds). *Recent Applications of Financial Risk Modelling and Portfolio Management*. 2021, p. 154-184. <https://doi.org/10.4018/978-1-7998-5083-0.ch008>.
18. Simonenko E.P., Dolgirev S.S. A statistical method for modeling the dependence of the oil-and-gas deposits rock saturations on the absolute depths and reservoir properties. *Nauchno-tehnicheskii vestnik "Karotazhnik"*. 2023;4:87-100. (In Russ.). EDN: EJSWBL.
19. Grishchenko V.A., Rabaev R.U., Asylgareev I.N., Mukhametshin V.Sh., Yakupov R.F. Methodological approach to optimal geological and technological characteristics determining when planning hydraulic fracturing at multilayer facilities. *SOCAR Proceedings*. 2021;2:182-191. (In Russ.). <https://doi.org/10.5510/OGP2021SI200587>.
20. Mukhametshin V.Sh. Oil flooding in carbonate reservoirs management. *SOCAR Proceedings*. 2022;1:37-43. (In Russ.). <https://doi.org/10.5510/OGP2022SI100643>.

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
<https://orcid.org/0000-0003-3283-1047>

**Гиззатуллина Алина Азатовна,**

кандидат физико-математических наук,
заместитель директора по научно-исследовательской работе,
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,
alina.gizzatullina87@mail.ru
<https://orcid.org/0009-0007-7506-8367>

Alina A. Gizzatullina,

Cand. Sci. (Phys. & Math.),
Deputy Director for Research,
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,
alina.gizzatullina87@mail.ru
<https://orcid.org/0009-0007-7506-8367>

Вклад авторов / Contribution of the authors

Р.А. Гилязетдинов – проведение расчетов при реализации этапов геолого-статистического моделирования, вывод основных уравнений, используемых в рамках дальнейшей интерпретации и обработки данных по объекту исследования.



Л.С. Кулешова – постановка задачи исследования, разработка и создание основных научно-методических подходов к вопросу эффективного управления процессами разработки нефтяных месторождений с использованием геолого-промысловой информации.

В.В. Мухаметшин – разработка методологии глубокой дифференциации залежей и внедрение ее ключевых компонентов в процесс исследования с использованием метода аналогий и ряда других методов, позволяющих существенно повысить достоверность получаемых геолого-статистических моделей.

А.А. Гиззатуллина – проведение экспериментальных исследований по определению закономерностей между изменениями основных параметров, характеризующих различные свойства продуктивных пластов и насыщающих их флюидов, с дальнейшим обоснованием возможности их прогноза на основании результатов глубокой идентификации.

Ruslan A. Gilyazetdinov conducted calculations under the implementation of the geological and statistical modeling stages, derived basic equations used in further interpretation and processing of data on the research object.

Lyubov S. Kuleshova formulated the research problem, developed and created basic scientific and methodological approaches to the solution of the problem of effective management of oil field development processes using geological and field information.

Vyacheslav V. Mukhametshin developed methodology for deep differentiation of deposits and introduced its key components into the research process using the analogue method and a number of other methods that can significantly increase the reliability of the obtained geological and statistical models.

Alina A. Gizzatullina conducted experimental studies to determine the variation patterns of the main parameters characterizing various properties of productive formations and the fluids saturating them, provided the justification of the possibility of their prediction based on the deep identification results.

Конфликт интересов / Conflict of interests

Авторы заявляют об отсутствии конфликта интересов.

The authors declare no conflicts of interests

Все авторы прочитали и одобрили окончательный вариант рукописи.

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

Информация о статье / Information about the article

Статья поступила в редакцию 22.12.2023; одобрена после рецензирования 20.02.2024; принята к публикации 26.02.2024.

The article was submitted 22.12.2023; approved after reviewing 20.02.2024; accepted for publication 26.02.2024.

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

Обзорная статья

УДК 550.837.21

EDN: MXFKTH

DOI: 10.21285/2686-9993-2024-47-1-56-65

Перспективы развития технологии регистрации
естественного электромагнитного излучения для прогноза
геодинамических явлений в условиях рудников НорильскаС.М. Данильев^a, О.М. Шнюкова^b✉^{a,b}Санкт-Петербургский горный университет, г. Санкт-Петербург, Россия

Резюме. Цель данного исследования заключалась в анализе современного состояния изученности вопроса опасных проявлений горного давления в естественных электромагнитных полях и оценке возможности использования данного явления для задач прогноза опасных геодинамических явлений на рудниках Норильского рудного района. Современные горнопромышленные технологии позволяют реализовывать добычу полезных ископаемых на достаточно больших глубинах, например, в рудниках Норильского региона добыча может вестись на отметках порядка 1,5–2 км, что существенно превышает критическую глубину проявлений опасных деформационных процессов. Объектом проведенных исследований являлись массивы пород Талнахского рудного узла Норильского района, склонные к проявлению опасных геодинамических явлений. Месторождения Норильского рудного района являются склонными или опасными по горным ударам. В связи с увеличением глубины разработки месторождений происходит активизация опасных геодинамических явлений, что влечет за собой необходимость их прогноза для обеспечения безопасного производства горных работ. Развитие геофизических технологий, а именно технологий электроразведки в естественных электромагнитных полях для прогноза сейсмических событий, является актуальной задачей, позволяющей обеспечить повышение безопасности производства горных работ. В результате анализа мирового опыта можно сделать вывод о перспективности использования регистрации естественного электромагнитного излучения для прогноза изменения состояния горного массива. В связи с тем, что на параметры естественного электромагнитного излучения влияет большое количество факторов, среди которых можно назвать литологический состав, особенности текстуры и структуры, технология прогноза для конкретного рудника должна базироваться на отклонении параметров естественного электромагнитного излучения от фоновых значений, зависящих от горно-геологических условий исследуемого рудника.

Ключевые слова: талнахский рудный узел, электромагнитное излучение, мониторинг, месторождения полезных ископаемых, аппаратура

Для цитирования: Данильев С.М., Шнюкова О.М. Перспективы развития технологии регистрации естественного электромагнитного излучения для прогноза геодинамических явлений в условиях рудников Норильска // Науки о Земле и недропользование. 2024. Т. 47. № 1. С. 56–65. <https://doi.org/10.21285/2686-9993-2024-47-1-56-65>. EDN: MXFKTH.

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

Review article

Development prospects of natural electromagnetic radiation
recording technology to predict geodynamic phenomena
in Norilsk minesSergey M. Daniliev^a, Olga M. Shnyukova^b✉^{a,b}Saint Petersburg Mining University, St. Petersburg, Russia

Abstract. The purpose of this study is to analyze the current level of knowledge on the issue of hazardous manifestations of rock pressure in natural electromagnetic fields as well as to assess the possibility of using this phenomenon for forecasting dangerous geodynamic phenomena in the open-pits of the Norilsk ore region. Modern mining technologies allow to extract

© Данильев С.М., Шнюкова О.М., 2024



minerals from fairly large depths, for example, in Norilsk region mining can be carried out at levels of about 1.5–2 km deep, which significantly exceeds the critical depth of dangerous deformation process manifestations. The object of the conducted research is the rock massifs of the Talnakh ore cluster in the Norilsk region prone to the manifestation of dangerous geodynamic phenomena. The deposits of the Norilsk ore region are liable to or dangerous for rock bumps. As the mining depth increases the hazardous geodynamic phenomena intensify, which justifies the need for hazardous phenomena prediction to ensure safe mining operations. The development of geophysical technologies (the electrical prospecting technologies in natural electromagnetic fields to predict seismic events in particular) is an urgent task that will improve the safety of mining operations. Based on the analysis of world experience we can conclude that the use of natural electromagnetic radiation recording to predict changes in the state of a rock massif is promising. Due to the fact that a large number of factors including lithological composition, texture and structure features influence the parameters of natural electromagnetic radiation the forecast technology for a specific mine should be based on the deviation of natural electromagnetic radiation parameters from background values that depend on the mining and geological conditions of the open-pit under investigation.

Keywords: Talnakh ore node, electromagnetic radiation, monitoring, mineral deposits, equipment

For citation: Daniliev S.M., Shnyukova O.M. Development prospects of natural electromagnetic radiation recording technology to predict geodynamic phenomena in Norilsk mines. *Nauki o Zemle i nedropol'zovanie = Earth sciences and subsoil use*. 2024;47(1):56-65. (In Russ.). <https://doi.org/10.21285/2686-9993-2024-47-1-56-65>. EDN: MXFKTH.

Введение

Экономическое развитие России неотъемлемо связано с природно-сырьевой базой нашей страны. Наряду с традиционными углеводородами большое внимание в этой отрасли уделяется и твердым полезным ископаемым, разработка которых преимущественно производится подземным способом. Интенсификация разработки месторождений твердых полезных ископаемых и увеличение планов по их добыче сопровождаются расширением границ добычи, переходом к разработке углубленных горизонтов, что может привести к развитию и активизации опасных геодинамических проявлений горного давления.

Целью представленной работы является обоснование перспективности использования методов регистрации естественных электромагнитных полей для прогноза опасных геодинамических процессов в условиях рудников Норильска.

Объектом исследования являются месторождения Норильского рудного узла [1], в частности Октябрьское (рисунок), которые являются склонными и опасными по горным ударам. В данных условиях крайне актуальной является задача прогноза геодинамических явлений для обеспечения безопасного и эффективного производства горных работ [2, 3].

Прогноз проявлений горного давления является трудноразрешимой задачей, так как существует множество факторов и условий, приводящих к катастрофическим явлениям. Появляется необходимость учитывать множество характеризующих состояние горного массива параметров, изменяющихся во времени. Оценке проявлений сейсмической опасности на рудниках, склонных к сейсмической

активности, посвящено большое количество исследований. Авторы публикаций предлагают либо новые методы количественной оценки опасности, либо демонстрируют их применение на реальных данных. Оценка сейсмической активности включает в себя:

- энергию сейсмических событий и координаты их гипоцентров;
- связь сейсмических событий с проведением горных работ на руднике;
- приуроченность геодинамических явлений к тектоническим нарушениям [4].

Известно, что геологическая среда представляет собой сложную открытую динамическую нелинейную систему, что затрудняет точное прогнозирование различных явлений, включая сейсмическую активность. Учитывая современное состояние развития техники и технологий горного производства, горные работы ведутся быстрым темпом, что приводит к перераспределению напряжений в массиве и развитию потенциальных рисков активизации геодинамических процессов. В связи с этим требуется разработка системы оперативного инструментального мониторинга горных выработок, которая обеспечила бы прогноз участков развития рисков неустойчивости горного массива, связанных с проявлением горного давления [5]. Поэтому единственным способом обеспечить контроль и точный прогноз развития геодинамических процессов является комплексный и подробный мониторинг [6].

Существующие методы мониторинга состояния горного массива

На месторождениях, склонных и опасных по горным ударам, выполняется комплекс работ по контролю геодинамической активности



Схема Талнахского рудного узла [1]:

1, 2 – медно-никелевые месторождения: 1 – Октябрьское, 2 – Талнахское; 3 – залежи богатых (сплошных) сульфидных платиноидно-медно-никелевых руд; 4 – границы Талнахского рудного узла (границы полей рудников); 5 – тектонические нарушения (зона главного шва Норильско-Харлаухского разлома)

Diagram of the Talnakh ore cluster [1]:

1, 2 – copper-nickel deposits: 1 – Oktyabrskoye, 2 – Talnakhskoye; 3 – deposits of rich (solid) sulfide platinum-copper-nickel ores; 4 – boundaries of the Talnakh ore cluster (borders of mine fields); 5 – tectonic disturbances (zone of the main suture of the Norilsk-Kharaulakh fault)

горного массива. Основными методами мониторинга состояния горных выработок являются:

1. Инструментальный маркшейдерский контроль, который позволяет систематически отслеживать развитие процессов перемещения горных пород. Некоторыми недостатками этого метода являются значительные времен-

ные промежутки между измерениями, а также трудоемкость съемки и обработки полученной информации.

2. Непрерывный сейсмический мониторинг, обеспечивающий геодинамическую безопасность месторождения. Системы сейсмического мониторинга предоставляют возможность регистрировать сейсмоакустические сигналы, ко-



торые появляются в результате динамических проявлений горного давления в породах. Также система позволяет осуществлять отбор сигналов на фоне помех, производить расчет характеристик и параметров сейсмических явлений, а также контролировать потенциально опасные шахтные участки в автоматическом режиме и автоматизировать обработку информации для оценки уровня риска [7, 8]. К недостаткам непрерывного сейсмического мониторинга можно отнести необходимость создания дорогостоящей сети сейсмопавильонов, что не позволяет делать оперативный прогноз для условий разработки новых рудников, а также трудоемкость обработки полученной информации.

3. Акустические методы, позволяющие определить потенциально опасные зоны проявления опасных геодинамических явлений в горном массиве. Импульсы акустической эмиссии возникают во время процесса трещинообразования массива горных пород. Индикаторами данного процесса является активность акустической эмиссии и b-фактор [9]. Недостатками метода акустической эмиссии является достаточно продолжительное время регистрации и необходимость обеспечения плотного контакта датчика (шпурового, микрошпурового, накладного) с обследуемым массивом.

4. Электромагнитный метод, основанный на явлении возникновения естественного электромагнитного излучения (ЕЭМИ) в процессе трещинообразования горных пород [10–12]. Применение метода электроразведки в естественных электромагнитных полях базируется на взаимосвязи ЕЭМИ с аномальным проявлением напряженно-деформационного состояния массива горных пород. К недостаткам измерений естественных электромагнитных полей можно отнести возможность регистрации электромагнитных помех и отсутствие полноценно научно обоснованной методики подземных исследований.

Анализируя специфику производства горных работ и методы мониторинга состояния горных выработок, можно сформулировать общие требования к технологиям контроля геодинамической активности горного массива:

- высокая скорость и производительность при производстве измерений и обработке результатов;

- минимизация дополнительных сопутствующих мероприятий, обеспечивающих производство измерений (бурение скважин, шпуров и т. д.);

- достоверность, обоснованность и представительность результатов прогноза.

Исходя из всего вышеперечисленного, перспективным методом мониторинга горных выработок представляется технология исследования ЕЭМИ, дающая возможность достаточно быстрого проведения полевых наблюдений, оценки результатов распределения электромагнитной эмиссии как предвестников сейсмических событий.

Источники и механизмы возникновения электромагнитной эмиссии в твердых телах

Электромагнитная эмиссия – это явление, которое представляет собой процесс возникновения электромагнитных полей при механическом воздействии на неметаллические материалы [13, 14]. По причине того, что технически реализована возможность регистрации ЕЭМИ с использованием бесконтактных приемных антенн, явление электромагнитной эмиссии заслуживает большого внимания и, как показывает опыт исследователей, оно обладает существенным практическим значением.

Электромагнитную эмиссию можно наблюдать в большинстве неметаллических материалов при различных видах механической нагрузки. Во время механической нагрузки на материалы, при возникновении микро- и макронарушений, а также в моменты, предшествующие разрушениям, происходит возникновение электромагнитных сигналов. Исходя из этого, по электромагнитным импульсам можно судить о возникновении процессов разрушения в материалах [15].

Механоэлектрические источники импульсных возмущений, наблюдаемые в твердых телах, являются источниками электромагнитного излучения за счет релаксации разделенных зарядов. В горных породах могут наблюдаться следующие явления: пьезоэлектрический эффект, эффект Степанова, процессы электризации при трении, разрушении [16, 17].

Одним из первых, кто наблюдал эффект появления электрического потенциала, был А.В. Степанов, который наблюдал явление возникновения заряда на поверхности каменной соли при пластической деформации кристалла. Заряд наблюдался при достижении напряжения выше предела текучести и исчезал при разгрузке. По мнению Степанова, причиной возникновения заряда является трение внутренних неоднородно-



стей кристалла и образование микротрещин. Степанов не только открыл это явление, но и изучил его основные закономерности. Он показал, что знак заряда может быть разным, определил величину заряда и заметил, что величина заряда зависит от геометрических размеров кристалла.

В 1970-х годах в Томском политехническом университете профессором Л.А. Воробьевым изучалась проблема появления электрических зарядов в земной коре. Предполагалось наличие явления накопления заряда в земной коре, были выделены следующие источники электрических явлений:

- электрические явления, источником которых является переход ионов через электрический барьер;

- явление пьезоэффекта;

- электризация при хрупком разрушении диэлектрических материалов [18].

Электромагнитное излучение возникает при колебательном движении электрических зарядов, локализованных в дефектах структуры [19]. Размер и число дефектов материалов влияет на амплитудно-частотные характеристики сигналов. Сигналы электромагнитного излучения сопровождают развитие трещин, разрывов и тому подобное, что дает возможность использовать данное явление для контроля над процессами возникновения и развития нарушений, а также диагностики технического состояния материалов. Использование методов неразрушающего контроля параметров электромагнитной и акустической эмиссии дает возможность осуществлять своевременную регистрацию и мониторинг опасных процессов разрушения горных пород на горных выработках, при этом не выводя объект из эксплуатации.

Согласно источнику [20], существуют следующие механизмы возникновения электромагнитных полей:

- колебательные механизмы возникновения электромагнитной эмиссии, такие как движение заряженных бортов трещин и движение электростатического поверхностного заряда, вызванное акустической волной в процессе разрушения материала (определено, что колебательные движения поверхности диэлектриков, как правило, создают внешнее электромагнитное поле за счет перемещения поверхностного заряда);

- искровой разряд между заряженными бортами трещин;

- скачкообразное разделение зарядов на поверхностях трещины в процессе разрушения материала.

В работе [21] исследовались явления возникновения электромагнитного излучения при упругом нагружении пород, не содержащих пьезоактивных кристаллов.

М.Е. Перельман и Н.Г. Хатиашвили показали, что процесс трещинообразования в твердых телах сопровождается возникновением электромагнитного излучения в диапазоне 10 кГц – 1000 МГц [15, 22]. Такие эффекты могут быть источником излучения при возникновении опасных геодинамических процессов.

В работе [23] проведена серия лабораторных испытаний на одноосное сжатие образцов горных пород с различными физическими свойствами, произведена оценка величины электромагнитного излучения. Установлено, что уровень электромагнитного излучения зависит от свойств горных пород: наибольшее значение электромагнитного излучения выделяется при разрушении хрупких горных пород, а наименьшее – при разрушении пластичных. Данный факт предлагается использовать для определения критерия склонности горных пород к хрупкому разрушению.

Разрабатываются методы оценки напряженно-деформированного состояния массива по параметрам электромагнитного излучения. А.А. Беспалько, Л.В. Яворович, Т.А. Климко произвели профильные измерения электромагнитного излучения, которые показали резкое увеличение значения электромагнитного излучения на контакте различных горных пород, что позволяет использовать данный метод в тектонически опасных зонах [21].

Известно, что при механическом нагружении горных пород в процессе их деформирования происходит образование микро- и макротрещин, сопровождающееся акустической и электромагнитной эмиссией. Согласно исследованию [24], существует взаимосвязь между явлениями электромагнитной и акустической эмиссии в диэлектриках. Во время механической нагрузки на горные породы происходит их деформирование. В этот момент возникают и два типа эмиссии: акустическая и электромагнитная.

Интенсивность акустической эмиссии увеличивается по мере развития процесса разрушения и достигает своей максимальной величины в момент макроразрушения. Образование трещин также приводит к появлению



зарядов на их гранях, которые ответственны за появление электромагнитной эмиссии [9].

В Научно-исследовательском институте горной геомеханики и маркшейдерского дела – Межотраслевом научном центре ВНИМИ разработан аппаратный комплекс ANGEL-M для измерения ЕЭМИ, позволяющий производить регистрацию параметров ЕЭМИ в лабораторных и полевых условиях. На базе комплекса ANGEL-M учеными ВНИМИ предложена технология проведения профильных съемок в подземных условиях угольных шахт для оценки интенсивности амплитуды ЕЭМИ на участках, склонных к сейсмической активности [25]. Данный подход апробирован на различных рудниках, в том числе в Норильске и Апатитах [26–28]. Сложившийся тренд свидетельствует о развитии и постепенном внедрении технологий, основанных на изучении ЕЭМИ, генерируемого горными породами, подверженными процессу деформирования вследствие геодинамических явлений.

Заключение

Анализ результатов исследований параметров и источников ЕЭМИ обосновывает перспективность направления регистрации ЕЭМИ с последующей обработкой данных для прогнозирования изменения состояния массива горных пород, локализации зон с потенциально опасным развитием геодинамических явлений. К сожалению, решение прямой задачи при регистрации ЕЭМИ по аналогии с классическими методами электроразведки практически невозможно, так

как на характеристики ЕЭМИ влияет огромное количество факторов, начиная от состава литологического строения, текстурно-структурных особенностей исследуемых пород и заканчивая распределением напряженно-деформированного состояния массива и крепостью пород. Поэтому методика прогноза геодинамических явлений для определенного рудника (породоносного комплекса) должна базироваться на отклонениях фоновых значений интенсивности амплитуды ЕЭМИ, формирующихся в горно-геологических условиях конкретного массива пород с учетом плана проведения горных работ. Для разработки методических рекомендаций прогноза геодинамических явлений в условиях рудников Норильска необходимо проведение опытно-методических работ для установления фоновых значений распределения ЕЭМИ в горно-геологических условиях исследуемого рудного поля. На следующем этапе для определения взаимосвязи между деформированием горных пород (аномальным проявлением горного давления) с интенсивностью акустической эмиссии и электромагнитного излучения необходимо провести лабораторные испытания при нагружении на прессовых установках серии образцов различных литотипов горных пород с исследуемого рудника. Полученные значения интенсивности изменений сигналов ЕЭМИ для конкретного литотипа и напряженно-деформированного состояния позволят получить диагностические признаки (критерии) для прогноза геодинамических явлений в условиях конкретного рудника Норильска.

Список источников

1. Наговицин Ю.Н., Какошина Л.В. Региональный прогноз удароопасности на рудниках ЗФ ПАО «ГМК «Норильский никель». Перспективы развития // Горное дело в XXI веке: технологии, наука, образование: материалы междунар. науч.-практ. конф. (г. Санкт-Петербург, 28–29 октября 2015 г.). Санкт-Петербург, 2015. С. 32–33.
2. Шабаров А.Н., Звездкин В.А., Анохин А.Г. Исследование напряженно-деформированного состояния интрузии при совместной отработке рудных залежей Октябрьского и Талнахского месторождений, склонных и опасных по горным ударам // Записки Горного института. 2012. Т. 198. С. 161–165. EDN: QZERST.
3. Звездкин В.А., Андреев А.А. Геомеханические основы безопасного ведения горных работ при совместной отработке богатых, медистых и вкрапленных руд глубоких рудников Талнаха // Записки Горного института. 2010. Т. 188. С. 47–49. EDN: RENUAP.
4. Маловичко Д.А. Оценка сейсмической опасности в рудниках // Российский сейсмологический журнал. 2020. Т. 2. № 2. С. 21–38. <https://doi.org/10.35540/2686-7907.2020.2.02>. EDN: EGQZBI.
5. Цирель С.В. Закономерности развития техногенной сейсмической активности при ведении горных работ // Записки Горного института. 2010. Т. 188. С. 58–62. EDN: RENUBT.
6. Козырев А.А., Савченко С.Н., Панин В.И., Семенова И.Э., Рыбин В.В., Федотова Ю.В. [и др.]. Геомеханические процессы в геологической среде горнотехнических систем и управление геодинамическими рисками: монография. Апатиты: Изд-во КНЦ РАН, 2019. 431 с. <https://doi.org/10.37614/978.5.91137.391.7>. EDN: ZKZKWA.
7. Наговицин Ю.Н., Какошина Л.В., Родионова Е.В., Мулёв С.Н. Система непрерывного сейсмического мониторинга на удароопасных месторождениях Норильска // Горный журнал. 2015. № 6. С. 36–40. <https://doi.org/10.17580/gzh.2015.06.07>. EDN: UGZLHZ.



8. Востриков В.И., Опарин В.Н., Усольцева О.М., Мулев С.Н. Оценка геодинамического состояния массивов горных пород на глубоких рудниках Норильско-Талнахского месторождения полиметаллов // *Фундаментальные и прикладные вопросы горных наук*. 2019. Т. 6. № 2. С. 28–34. <https://doi.org/10.15372/FPVGN2019060205>. EDN: ZOGVRO.
9. Рассказов И.Ю., Цирель С.В., Розанов А.О., Терешкин А.А., Гладырь А.В. Использование данных сейсмоакустических наблюдений для определения характера развития очага разрушения породного массива // *Физико-технические проблемы разработки полезных ископаемых*. 2017. № 2. С. 29–37. EDN: YPBWBB.
10. Wei M., Song D., He X., Li Z., Qiu L., Lou Q. Effect of rock properties on electromagnetic radiation characteristics generated by rock fracture during uniaxial compression // *Rock Mechanics and Rock Engineering*. 2020. Vol. 53. P. 5223–5238. <https://doi.org/10.1007/s00603-020-02216-x>.
11. Lin P., Wei P., Wang C., Kang S., Wang X. Effect of rock mechanical properties on electromagnetic radiation mechanism of rock fracturing // *Journal of Rock Mechanics and Geotechnical Engineering*. 2021. Vol. 13. Iss. 4. P. 798–810. <https://doi.org/10.1016/j.jrmge.2021.01.001>.
12. Li Z., Lei Y., Wang E., Frid V., Li D., Liu, X., et al. Characteristics of electromagnetic radiation and the acoustic emission response of multi-scale rock-like material failure and their application // *Foundations*. 2022. Vol. 2. P. 763–780. <https://doi.org/10.3390/foundations2030052>.
13. Махмудов Х.Ф., Куксенко В.С. Электромагнитные явления при деформировании и разрушении твердых диэлектриков // *Физика твердого тела*. 2005. Т. 47. № 5. С. 856–859. EDN: RDABMV.
14. Han J., Huang S., Zhao W., Wang S., Deng Y. Study on electromagnetic radiation in crack propagation produced by fracture of rocks // *Measurement*. 2019. Vol. 131. P. 125–131. <https://doi.org/10.1016/j.measurement.2018.06.067>.
15. Перельман М.Е., Хатиашвили Н.Г. О радиоизлучении при хрупком разрушении диэлектриков // *Доклады Академии наук СССР*. 1981. Т. 256. № 4. С. 824–826.
16. Гохберг М.Б., Гуфельд И.Л., Добровольский И.П. Источники электромагнитных предвестников землетрясений // *Доклады Академии наук СССР*. 1980. Т. 250. № 2. С. 323–326.
17. Гохберг М.Б., Моргунов В.А., Аронов Е.Л. О высокочастотном электромагнитном излучении при сейсмической активности // *Доклады Академии наук СССР*. 1979. Т. 248. № 5. С. 1077–1081.
18. Воробьев Л.А. О возможности электрических разрядов в недрах Земли // *Геология и геофизика*. 1970. Т. 11. № 12. С. 3–13.
19. Гордеев В.Ф., Малышков Ю.П., Малышков С.Ю., Поливач В.И., Шталин С.Г. Электромагнитный мониторинг технического состояния бетонных конструкций, мостовых переходов и других искусственных сооружений // *Горный информационно-аналитический бюллетень*. 2009. № S17. С. 225–229. EDN: KIFEYI.
20. Гордеев В.Ф., Малышков Ю.П., Чахлов В.Л., Фурса Т.В., Биллер В.К., Елисеев В.П. Электромагнитная эмиссия диэлектрических материалов при статическом и динамическом нагружении // *Журнал технической физики*. 1994. Т. 64. № 4. С. 57–67.
21. Беспалько А.А., Яворович Л.В., Климко Т.А. Исследование электромагнитной эмиссии контактов горных пород в шахтном поле // *Физическая мезомеханика*. 2004. Т. 7. № 2. С. 285–287. <https://doi.org/10.24411/1683-805X-2004-00027>.
22. Хатиашвили Н.Г., Перельман М.Е. Генерация электромагнитного излучения при прохождении акустических волн через кристаллические диэлектрики и некоторые горные породы // *Доклады Академии наук СССР*. 1982. Т. 263. № 4. С. 839–842.
23. Вострецов А.Г., Кривецкий А.В., Бизяев А.А., Яковичкая Г.Е. Характеристики электромагнитного излучения горных пород при их разрушении в лабораторных экспериментах // *Доклады Академии наук высшей школы Российской Федерации*. 2013. № 2. С. 46–54. EDN: RFABFV.
24. Беспалько А.А., Яворович Л.В., Федотов П.И. Связь параметров электромагнитных сигналов с электрическими характеристиками горных пород при акустическом и квазистатическом воздействиях // *Известия Томского политехнического университета. Инжиниринг георесурсов*. 2005. Т. 308. № 7. С. 18–23. EDN: HROTMF.
25. Мулев С.Н., Старников В.Н., Романевич О.А. Современный этап развития геофизического метода регистрации естественного электромагнитного излучения (ЕЭМИ) // *Уголь*. 2019. № 10. С. 6–14. <https://doi.org/10.18796/0041-5790-2019-10-6-14>. EDN: EJOFQL.
26. Daniliev S., Danilieva N., Mulev S., Frid V. Integration of seismic refraction and fracture-induced electromagnetic radiation methods to assess the stability of the roof in mine-workings // *Minerals*. 2022. Vol. 12. Iss. 5. P. 609. <https://doi.org/10.3390/min12050609>. EDN: DUOUDO.
27. Простов С.М., Разумов Е.Е., Мулев С.Н., Шабанов Е.А. Расчетная и аппаратная база геомониторинга состояния массива методом регистрации естественного электромагнитного излучения // *Известия Томского политехнического университета. Инжиниринг георесурсов*. 2022. Т. 333. № 11. С. 183–193. <https://doi.org/10.18799/2413-1830/2022/11/3840>. EDN: FKWVBW.
28. Егоров А.П., Рыжов В.А. К вопросу систематизации геофизических исследований геомеханического состояния массива горных пород и земной поверхности для оперативного контроля безопасности ведения горных работ на угольных шахтах // *Уголь*. 2019. № 10. С. 29–33. <https://doi.org/10.18796/0041-5790-2019-10-29-33>. EDN: ZCRGQY.

References

1. Nagovitsin Yu.N., Kakoshina L.V. Regional forecast of rock-bump hazard at the PJSC Mining Metallurgical Company Norilsk Nickel mines. Development prospects. In: *Gornoe delo v XXI veke: tekhnologii, nauka, obrazovanie: materialy mezhdunar. nauch.-prakt. konf. = Mining in the 21st century: technology, science, education: materials of the*



international scientific and practical conference: scientific conference materials. 28–29 October 2015, Saint Petersburg. Saint Petersburg; 2015, p. 32-33. (In Russ.).

2. Shabarov A.N., Zvezdkin V.A., Anokhin A.G. Studies of the stress-strain state of intrusion in the process of joint mining of ore deposits of the Oktyabrskiy and Talnakhskiy deposits. *Zapiski Gornogo instituta = Journal of Mining Institute*. 2012;198:161-165. (In Russ.). EDN: QZERST.

3. Zvezdkin V.A., Andreev A.A. Geomechanical foundations of the safe extraction in joint mining of rich, coppery and ore patches in deep ore mines at Talnakh. *Zapiski Gornogo instituta = Journal of Mining Institute*. 2010;188:47-49. (In Russ.). EDN: RENUAP.

4. Malovichko D.A. Assessment of seismic hazard in mines. *Rossiiskii seismologicheskii zhurnal = Russian Journal of Seismology*. 2020;2(2):21-38. (In Russ.). <https://doi.org/10.35540/2686-7907.2020.2.02>. EDN: EGQZBI.

5. Tsirel S.V. Regularities of progressing of technogenic seismic activity in mining areas. *Zapiski Gornogo instituta = Journal of Mining Institute*. 2010;188:58-62. (In Russ.). EDN: RENUBT.

6. Kozyrev A.A., Savchenko S.N., Panin V.I., Semenova I.Eh., Rybin V.V., Fedotova Yu.V., et al. *Geomechanical processes in the geological environment of mining engineering systems and geodynamic risk management*. Apatity: Kola Science Centre RAS; 2019, 431 p. (In Russ.). <https://doi.org/10.37614/978.5.91137.391.7>. EDN: ZKZKWA.

7. Nagovitsin Yu.N., Kakoshina L.V., Rodionova E.V., Mulev S.N. Continuous seismic monitoring at rockburst-hazardous deposits in the Norilsk area. *Gornyi Zhurnal*. 2015;6:36-40. (In Russ.). <https://doi.org/10.17580/gzh.2015.06.07>. EDN: UGZLHZ.

8. Vostrikov V.I., Oparin V.N., Usoltseva O.M., Mulev S.N. The assessment of the geodynamic state of rock massifs in deep mines of the Norilsk-Talnakh polymetallic deposit. *Fundamental'nye i prikladnye voprosy gornykh nauk*. 2019;6(2):28-34. (In Russ.). <https://doi.org/10.15372/FPVGN2019060205>. EDN: ZOGVRO.

9. Rasskazov I.Yu., Tereshkin A.A., Gladyr A.V., Tsirel S.V., Rozanov A.O. Application of acoustic measurement data to characterize initiation and development of disintegration focus in a rock mass. *Fiziko-tekhnicheskie problemy razrabotki poleznykh iskopaemykh*. 2017;2:29-37. (In Russ.). EDN: YPBWBB.

10. Wei M., Song D., He X., Li Z., Qiu L., Lou Q. Effect of rock properties on electromagnetic radiation characteristics generated by rock fracture during uniaxial compression. *Rock Mechanics and Rock Engineering*. 2020;53:5223-5238. <https://doi.org/10.1007/s00603-020-02216-x>.

11. Lin P., Wei P., Wang C., Kang S., Wang X. Effect of rock mechanical properties on electromagnetic radiation mechanism of rock fracturing. *Journal of Rock Mechanics and Geotechnical Engineering*. 2021;13(4):798-810. <https://doi.org/10.1016/j.jrmge.2021.01.001>.

12. Li Z., Lei Y., Wang E., Frid V., Li D., Liu, X., et al. Characteristics of electromagnetic radiation and the acoustic emission response of multi-scale rock-like material failure and their application. *Foundations*. 2022;2:763-780. <https://doi.org/10.3390/foundations2030052>.

13. Makhmudov Kh.F., Kuksenko V.S. Electromagnetic phenomena entailed by deformation and fracture of dielectric solids. *Fizika tverdogo tela*. 2005;47(5):856-859. (In Russ.). EDN: RDABMV.

14. Han J., Huang S., Zhao W., Wang S., Deng Y. Study on electromagnetic radiation in crack propagation produced by fracture of rocks. *Measurement*. 2019;131:125-131. <https://doi.org/10.1016/j.measurement.2018.06.067>.

15. Perelman M.E., Khatishvili N.G. On radio emission during brittle destruction of dielectrics. *Doklady Akademii nauk SSSR*. 1981;256(4):824-826. (In Russ.).

16. Gokhberg M.B., Gufeld I.L., Dobrovolskiy I.P. Sources of electromagnetic precursors of earthquakes. *Doklady Akademii nauk SSSR*. 1980;250(2):323-326. (In Russ.).

17. Gokhberg M.B., Morgunov V.A., Aronov E.L. On high-frequency electromagnetic radiation during the seismic activity. *Doklady Akademii nauk SSSR*. 1979;248(5):1077-1081. (In Russ.).

18. Vorob'ev L.A. On the possibility of electrical discharges in the Earth's interior. *Geologiya i geofizika*. 1970;11(12):3-13. (In Russ.).

19. Gordeev V.F., Malyshkov Yu.P., Malyshkov S.Yu., Polivah V.I., Shtalin S.G. Electromagnetic monitoring of a technical condition of concrete frame, highway stream crossing and the other artificial constructions. *Gornyi informatsionno-analiticheskii byulleten' = Mining informational and analytical bulletin*. 2009;S17:225-229. EDN: KIFEYI.

20. Gordeev V.F., Malyshkov Yu.P., Chakhlov V.L., Fursa T.V., Biller V.K., Eliseev V.P. Electromagnetic emission of dielectric materials under static and dynamic loading. *Zhurnal tekhnicheskoi fiziki*. 1994;64(4):57-67. (In Russ.).

21. Bepalko A.A., Yavorovich L.V., Klimko T.A. A study of electromagnetic emission of rock contacts in mine massif. *Fizicheskaya mezhmekhanika*. 2004;7(2):285-287. (In Russ.). <http://dx.doi.org/10.24411/1683-805X-2004-00027>.

22. Khatishvili N.G., Perelman M.E. Generation of the electromagnetic radiation during acoustic wave transmission through crystalline dielectrics and some rocks. *Doklady Akademii nauk SSSR*. 1982;263(4):839-842. (In Russ.).

23. Vostretsov A.G., Krivetsky A.V., Bizyaev A.A., Yakovitskaya G.E. Electromagnetic radiation characteristics of rocks in their destruction in laboratory experiments. *Doklady Akademii nauk vysshey shkoly Rossiyskoy Federatsii = Proceedings of the Russian Higher School Academy of Sciences*. 2013;2:46-54. (In Russ.). EDN: RFABFV.

24. Bepal'ko A.A., Yavorovich L.V., Fedotov P.I. Relationship between electromagnetic signal parameters and rock electrical characteristics under acoustic and quasi-static influences. *Izvestiya Tomskogo politekhnicheskogo universiteta. Inzhiniring georesursov = Bulletin of the Tomsk Polytechnic University. Geo Assets Engineering*. 2005;308(7):18-23. (In Russ.). EDN: HROTME.

25. Mulev S.N., Starnikov V.N., Romanevich O.A. The current development stage of the geophysical method of natural electromagnetic radiation recording. (EMI). *Ugol' = Russian Coal Journal*. 2019;10:6-14. (In Russ.). <https://doi.org/10.18796/0041-5790-2019-10-6-14>. EDN: EJOFQL.



26. Daniliev S., Danilieva N., Mulev S., Frid V. Integration of seismic refraction and fracture-induced electromagnetic radiation methods to assess the stability of the roof in mine-workings. *Minerals*. 2022;12(5):609. <https://doi.org/10.3390/min12050609>. EDN: DUOUDO.

27. Prostov S.M., Razumov E.E., Mulev S.N., Shabanov E.A. Calculation and hardware base for geomonitoring the state of the array by registering natural electromagnetic radiation. *Izvestiya Tomskogo politekhnicheskogo universiteta. Inzhiniring geosursov = Bulletin of the Tomsk Polytechnic University. Geo Assets Engineering*. 2022;333(11):183-193. (In Russ.). <https://doi.org/10.18799/24131830/2022/11/3840>. EDN: FKWVBW.

28. Egorov A.P., Ryzhov V.A. To the issue of systematization of geophysical studies of the geomechanical state of rock mass and the Earth's surface for operational monitoring of the safety of mining in coal mines. *Ugol' = Russian Coal Journal*. 2019;10:29-33. (In Russ.). <https://doi.org/10.18796/0041-5790-2019-10-29-33>. EDN: ZCRGQY.

Информация об авторах / Information about the authors



Данильев Сергей Михайлович,

кандидат геолого-минералогических наук, доцент,
доцент кафедры геофизики,
Санкт-Петербургский горный университет,
г. Санкт-Петербург, Россия,
Danilev_sm@pers.spmi.ru
<https://orcid.org/0000-0003-3057-8527>

Sergey M. Daniliev,

Cand. Sci. (Geol. & Mineral.), Associated Professor,
Associated Professor of the Geophysics Department,
Saint Petersburg Mining University,
St. Petersburg, Russia,
Danilev_sm@pers.spmi.ru
<https://orcid.org/0000-0003-3057-8527>



Шнюкова Ольга Михайловна,

аспирант,
Санкт-Петербургский горный университет,
г. Санкт-Петербург, Россия,
s225008@stud.spmi.ru
<https://orcid.org/0009-0008-1368-2860>

Olga M. Shnyukova,

Postgraduate Student,
Saint Petersburg Mining University,
St. Petersburg, Russia,
s225008@stud.spmi.ru
<https://orcid.org/0009-0008-1368-2860>

Вклад авторов / Contribution of the authors

С.М. Данильев – постановка задач и целей исследования, разработка концепции статьи, редактирование текста, обобщение результатов.

О.М. Шнюкова – подготовка и редактирование текста, сбор и обобщение данных литературы, описание состояния изученности вопроса проявлений геодинамических явлений в электромагнитных полях, описание перспективы осуществления прогноза геодинамических явлений в условиях рудников Норильского рудного района, написание заключения.

Sergey M. Daniliev set the purpose and objectives of the research, developed the concept of the article, edited the text and summarized the results.

Olga M. Shnyukova prepared and edited the text of the article, reviewed the selected literature, described the level of knowledge on the issue of geodynamic phenomena manifestations in electromagnetic fields, described the prospects for geodynamic phenomena prediction in the mines of the Norilsk ore region, wrote a conclusion.

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 02.02.2024; одобрена после рецензирования 13.02.2024; принята к публикации 18.02.2024.

The article was submitted 02.02.2024; approved after reviewing 13.02.2024; accepted for publication 18.02.2024.



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

Научная статья

УДК 504.064

EDN: LPXNLT

DOI: 10.21285/2686-9993-2024-47-1-66-89



Территория бывшей промплощадки Ангарского металлургического завода (г. Свирск) 10 лет спустя: современное геохимическое состояние и анализ межгодовых изменений по данным дистанционного зондирования Земли

О.Л. Качор^{a,✉}, В.В. Трусова^b, С.А. Гантимурова^c,
И.Н. Горячев^d, З.Л. Икрамов^e, А.В. Паршин^f

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

^{b,c,f}Институт геохимии им. А.П. Виноградова СО РАН, г. Иркутск, Россия

Резюме. В рамках инициативных геоэкологических исследований, целью которых являлась оценка влияния отходов с промплощадки завода «Востсибэлемент» на экосистему г. Свирска (Иркутская область), были попутно обнаружены аномалии с сильным мышьяковистым и полиметаллическим загрязнением, расположенные в 200 м от границы промплощадки завода «Востсибэлемент» на северо-запад. Частью загрязненного участка является бывшая промплощадка Ангарского металлургического завода, которая была успешно рекультивирована в 2009–2013 гг. В связи с этим встали вопросы детального изучения современной эколого-геохимической обстановки на участке и установления процессов, в результате которых рекультивированный объект снова характеризуется наличием значительного загрязнения. Для оценки современного геохимического состояния проведена четверо более детальная по сравнению с требованиями государственного стандарта эколого-геохимическая съемка, сопровождавшаяся экспрессным рентгенофлуоресцентным анализом проб. В результате на площади более 30 га, из которых 13 га относятся к бывшей промплощадке Ангарского металлургического завода, выявлено наличие загрязнения с превышением нормативов по мышьяку, свинцу, меди и цинку в десятки и сотни раз. При этом установлено изменение характера загрязнения и пространственной локализации основных аномалий относительно изначальной ситуации на 2009 г.: в настоящее время загрязнение сосредоточено на периферийных участках промплощадки и за ее пределами и имеет хаотичный характер (концентрации поллютантов в соседних пробах, даже отобранных по сети 50×50 м, могут отличаться в сотни раз), на рекультивированных с вывозом грунта участках значимое загрязнение отсутствует. Для ретроспективного анализа изменений обстановки на площадке во время рекультивационных работ 2009–2013 гг. и после их завершения вплоть до лета 2022 г. применен анализ данных спутникового мультиспектрального зондирования Земли Landsat и Sentinel. С временным разрешением не хуже одного снимка в месяц проанализированы материалы в видимом и ближнем инфракрасном диапазоне, основным информативным показателем выбран нормализованный дифференциальный индекс биомассы растительного покрова (NDVI), явно отражающий факты изменения типа поверхности промплощадки и позволяющий оценить развитие на участке растительности, что является важным косвенным индикатором эколого-геохимической ситуации. В результате установлена хорошая сходимости геохимических и дистанционных данных и показано, что рекультивационные мероприятия были проведены в необходимом объеме и дали заметный результат: явно фиксируются мероприятия по вывозу и завозу условно чистого и условно плодородного грунта, замечен положительный геоботанический эффект от этих мероприятий, выражающийся в изменении типа и увеличении биомассы растительности на рекультивированных участках по сравнению с периферийными участками, оставленными под самозаращение аборигенной растительности. Показано, что через некоторое время этот эффект пропадает и на площади формируется единый тип растительности, однако явных фактов существенного техногенного влияния на промплощадку после окончания мониторинговых мероприятий в 2016 г. по мультиспектральным спутниковым данным не выявлено, на площадке определенно не осуществлялось снятия грунта или завоза больших объемов отходов, растительность развивалась синхронно с фоновыми участками. Таким образом, проведенное исследование позволило достоверно подтвердить факт загрязнения и детально его охарактеризовать, проследить ход рекультивационных мероприятий и доказать наличие положительных экологических эффектов и в то же время опровергнуть гипотезу о возможности вторичного загрязнения в результате явного антропогенного влияния. При этом показано, что проведение геохимических исследований подобных объектов в соответствии с действующими государственными стандартами может приводить к получению искаженных представлений о его состоянии и только большая методическая свобода научных исследований по сравнению с работами в рамках госзаданий позволила выявить хаотичный характер загряз-



нения на периферийных участках площади и за ее пределами. Однако даже достигнутая детальность определенно не позволяет считать представленную в статье эколого-геохимическую характеристику объекта окончательной, представляется необходимым еще минимум четырехкратное сгущение сети пробоотбора. Также остается неизученной степень вероятного «мягкого» постепенного загрязнения промплощадки вследствие переноса и миграции загрязняющих веществ с близлежащих объектов (вплоть до II класса опасности), которые могут быть источниками дополнительного вторичного загрязнения всеми обнаруженными элементами. Таким образом, полученные данные указывают на необходимость проведения дополнительного комплекса инженерно-экологических работ, далеко выходящих за рамки инициативных научных исследований. Методологическим выводом из работы является доказательство эффективности примененного подхода к геоэкологическим исследованиям, который позволил оперативно, достоверно и с низкими затратами оценить современную ситуацию, проанализировать, подтвердить или опровергнуть гипотезы о развитии ситуации и потому может быть успешно использован в других подобных случаях.

Ключевые слова: Свирск, экологический мониторинг, объекты накопленного вреда, Ангарский металлургический завод, Востсибэлемент, рекультивация, дистанционные методы в геоэкологии, тяжелые металлы, почва, загрязнение

Финансирование: Работа выполнена при поддержке программы «Приоритет 2030» в рамках реализации стратегического проекта Иркутского национального исследовательского технического университета i.GeoDesign.

Для цитирования: Качор О.Л., Трусова В.В., Гантимурова С.А., Горячев И.Н., Икрамов З.Л., Паршин А.В. Территория бывшей промплощадки Ангарского металлургического завода (г. Свирск) 10 лет спустя: современное геохимическое состояние и анализ межгодовых изменений по данным дистанционного зондирования Земли // Науки о Земле и недропользование. 2024. Т. 47. № 1. С. 66–89. <https://doi.org/10.21285/2686-9993-2024-47-1-66-89>. EDN: LPXNLT.

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

Original article

The former industrial site of the Angarsk Metallurgical Plant (Svirsk, Russia) 10 years later: current geochemical state and interannual change analysis based on Earth remote sensing data

Olga L. Kachor^{a,✉}, Valentina V. Trusova^b, Svetlana A. Gantimurova^c,
Ivan N. Goryachev^d, Ziyoviddin L. Ikramov^e, Alexander V. Parshin^f

^{a-f}Irkutsk National Research Technical University, Irkutsk, Russia

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

Abstract. As part of proactive geoecological research, the purpose of which was to assess the impact of waste from the industrial site of the Vostsibelelement plant on the ecosystem of the town of Svirsk (Irkutsk region), the authors discovered anomalies with strong arsenic and polymetallic contamination located 200 m north-west from the boundary of the industrial site of the “Vostsibelelement” plant. Part of the contaminated site is the former industrial site of the Angarsk Metallurgical Plant, which was successfully remediated in 2009–2013. This raised the questions of a detailed study of the current environmental and geochemical situation at the site and identification of the processes causing the presence of significant contamination on the previously successively reclaimed site. To estimate the current geochemical state of the site, an environmental-geochemical survey, which was four times more detailed than the requirements of the state standard, was carried out, accompanied by rapid X-ray fluorescence analysis of samples. As a result, it was found out that on the area of more than 30 hectares, 13 hectares of which belong to the former industrial site of the Angarsk Metallurgical Plant, the present pollution exceeded the standards for arsenic, lead, copper and zinc by tens and hundreds of times. At the same time, it was determined that the nature of pollution and the spatial localization of the main anomalies had changed relative to the initial situation in 2009: currently, pollution is concentrated in the peripheral areas of the industrial site and beyond and is chaotic in nature (pollutant concentrations in neighboring samples, even taken over a mesh of 50×50 m, may differ by hundreds of times). The sites reclaimed with soil removal feature no significant contamination. For a retrospective analysis of changes in the situation at the site during reclamation works in 2009–2013 and after their completion, until the summer of 2022, the analysis of Landsat and Sentinel satellite multispectral sensing data was applied. With a time resolution of no worse than one image per month, the materials in the visible and near-infrared range were analyzed. The normalized differential vegetation biomass index (NDVI) was chosen to be the main informative indicator as it clearly reflects the facts of changes in the surface type of the industrial site and allows to assess the vegetation development on the site, which is an important indirect indicator of the environmental and geochemical situation. As a result, a good convergence of geochemical and remote sensing data was established and it was shown that reclamation measures had been carried out



to the required extent and gave a noticeable result: the measures taken to remove the polluted soil and deliver conditionally clean and conditionally fertile soil are clearly recorded. A positive geobotanical effect from these measures is noticeable since there is the change in the vegetation type and biomass increase in the reclaimed areas compared to peripheral areas left for self-overgrowth by native vegetation. It is shown that with the time this effect disappears and a single type of vegetation is formed on the area. However, no obvious facts of significant technogenic impact on the industrial site after the end of monitoring activities in 2016 according to multispectral satellite data were revealed. There was not any soil removal or delivery of large volumes of waste on the site. The vegetation developed synchronously with the background areas. Thus, the study reliably confirmed the fact of pollution and described it in detail, tracked the progress of reclamation measures and proved the presence of positive environmental effects. It also refuted the hypothesis about the possibility of secondary pollution as a result of obvious anthropogenic influence. At the same time, it is shown that geochemical studies of such objects conducted in accordance with current state standards can distort understanding about their condition, while greater methodological freedom of scientific research compared to the work within the framework of government assignments allows to reveal the chaotic nature of pollution in the peripheral areas of the area and beyond. But even the achieved detailed description definitely does not allow us to consider the ecological and geochemical characteristics of the object presented in the article as final as it seems necessary to thicken the sampling mesh at least by four times. The degree of probable "soft" gradual pollution of the industrial site due to the transfer and migration of pollutants from nearby objects (up to II hazard class), which can be sources of additional secondary pollution with all detected elements, also remains unexplored. Thus, the data obtained indicate the need for an additional set of engineering and environmental work that goes far beyond the scope of the proactive scientific research. The methodological conclusion from the work is the proof of the applied approach effectiveness and applicability to geoecological research, which can make it possible to assess the current situation quickly, reliably and at low cost as well as to analyze, confirm or refute the hypotheses about the development of the situation and therefore can be successfully used in other similar cases.

Keywords: Svirsk, environmental monitoring, objects of accumulated harm, Angarsk Metallurgical Plant, Vostsibelemt, reclamation, remote sensing methods in geoecology, heavy metals, soil, pollution

Funding: The work was funded by the "Priority 2030" federal state program as part of the Irkutsk National Research Technical University strategic project "i.GeoDesign".

For citation: Kachor O.L., Trusova V.V., Gantimurova S.A., Goryachev I.N., Ikramov Z.L., Parshin A.V. The former industrial site of the Angarsk Metallurgical Plant (Svirsk, Russia) 10 years later: current geochemical state and interannual change analysis based on Earth remote sensing data. *Nauki o Zemle i nedropol'zovanie = Earth sciences and subsoil use*. 2024;47(1):66-89. (In Russ.). <https://doi.org/10.21285/2686-9993-2024-47-1-66-89>. EDN: LPXNLT.

Введение

По данным Министерства природных ресурсов и экологии РФ, на конец 2023 г. на территории России выявлено более 2000 потенциальных объектов накопленного вреда¹. При этом отсутствует достоверная информация о степени их воздействия на окружающую среду, здоровье и продолжительность жизни граждан². На решение этой проблемы в частности направлен федеральный проект «Генеральная уборка», призванный реализовать усовершенствованную систему ликвидации накопленного вреда окружающей среде [1]. Функции обследования и оценки объектов накопленного вреда должны осуществляться Росприроднадзором с привлечением подведомственных федеральных государственных

бюджетных учреждений на основании госзадания², однако это не исключает инициативных исследований, реализуемых в рамках научных программ и грантов Министерства науки и образования Российской Федерации и других ведомств. Таким способом были получены значительные объемы актуальной эколого-геохимической информации об объектах накопленного вреда как в целом по стране, так и в Байкальском регионе [2–8]. Хотелось бы отметить, что в отличие от обследований и инженерно-экологических работ, выполняемых в рамках государственных программ, научные геоэкологические исследования не ограничены набором методов, детальностью исследований, временным периодом и так далее, то есть имеют гораздо большую методи-

¹ Перечень объектов накопленного экологического вреда // Министерство природных ресурсов и экологии Российской Федерации. Режим доступа: https://mnr.gov.ru/opendata/7710256289-objects_of_accumulated_environmental_damage (дата обращения: 20.12.2023).

² Порядок выявления, обследования, оценки, ликвидации: Госдума одобрила законопроект, который создает правовые механизмы для реализации федпроекта «Генеральная уборка» // Министерство природных ресурсов и экологии Российской Федерации. Режим доступа: https://www.mnr.gov.ru/press/news/poryadok_vyyavleniya_obsledovaniya_otsenki_likvidatsii_gosduma_odobrila_zakonoproekt_kotoryy_sozdaye/ (дата обращения: 20.12.2023).



ческую свободу, что потенциально позволяет получать более расширенную информацию.

Институт «Сибирская школа геонаук» Иркутского национального исследовательского технического университета в рамках реализации федерального проекта «Приоритет 2030» ставит своей задачей повышение качества образования будущих геоспециалистов, в связи с чем реализует ряд учебных дисциплин в формате исследовательской и проектной работы. В некоторые образовательные программы интегрированы социально-значимые кейсы по исследованию геоэкологической обстановки различных населенных пунктов Иркутской области. Вовлеченность большого количества студентов позволяет ежегодно решать масштабные исследовательские задачи^{3,4}.

В 2021–2022 гг. в число таких объектов исследования вошел г. Свирск с фокусом на

бывшую промплощадку завода «Востсибэлемент», занимавшегося выпуском аккумуляторов до 1999 г. В ходе проведения комплекса геоэкологических работ было установлено, что данная площадка представляет собой объект накопленного вреда окружающей среде с отходами до II класса опасности [9]. Для изучения возможного влияния этого объекта накопленного вреда на компоненты окружающей среды за пределами промплощадки были проведены исследования с отбором проб природных объектов траверсами по направлению розы ветров (рис. 1). Преобладающее направление ветра в городе северо-западное и юго-восточное. В юго-восточном направлении от промплощадки находится водный объект – река Ангара, к северо-западу расположены промышленные зоны и садоводческие территории.

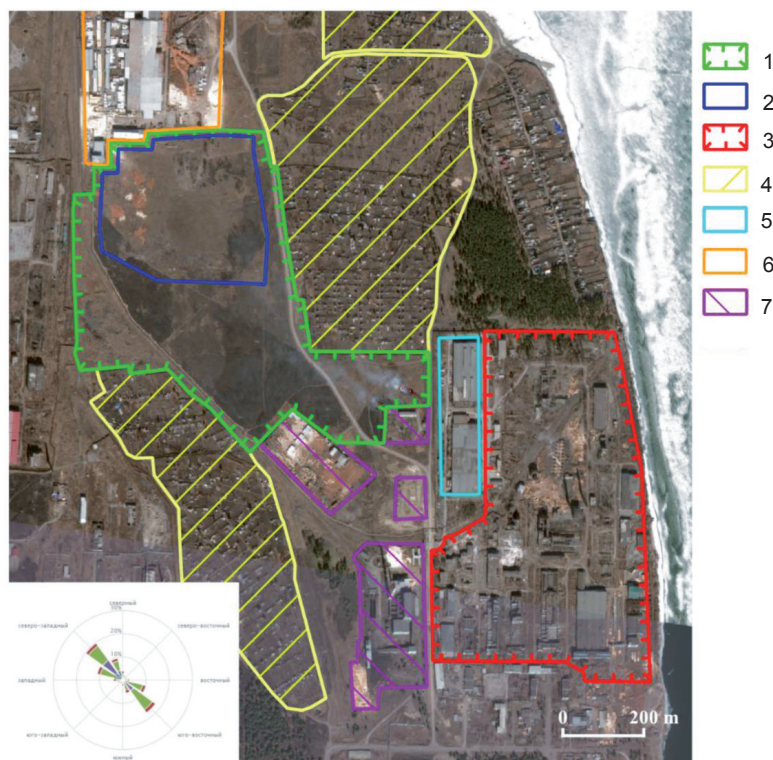


Рис. 1. Схема расположения промплощадки завода «Востсибэлемент» и близлежащих территорий:
1 – исследованная территория; 2 – рекультивированная территория бывшей промплощадки Ангарского металлургического завода; 3 – бывшая промплощадка завода «Востсибэлемент»; 4 – садоводства;
5 – территория завода «АкТех»; 6 – территория предприятия «ТМ Байкал»;
7 – прочие промышленные территории

Fig. 1. Layout of the industrial site of the Vostsibelelement plant and surrounding areas:
1 – explored area; 2 – reclaimed territory of the former industrial site of Angarsk metallurgical plant; 3 – former industrial site of the Vostsibelelement plant; 4 – horticultural cooperatives;
5 – AkTech plant territory; 6 – “TM Baikal” enterprise territory; 7 – other industrial areas

³ Результаты инициативных исследований Сибирской школы геонаук по программе «Приоритет 2030» вошли в госдоклад Иркутской области // ИРНИТУ. Режим доступа: <https://www.istu.edu/novosti/pub/73299> (дата обращения: 20.12.2023).

⁴ SSG ИРНИТУ изучает состав снега для создания ГИС, отображающей качество воздуха в Иркутске и Свирске // ИРНИТУ. Режим доступа: <https://www.istu.edu/novosti/pub/65666> (дата обращения: 20.12.2023).



В результате изучения состояния почвы, снежного покрова и растительности на территориях, находящихся в зоне атмосферного переноса загрязняющих веществ с промплощадки завода «Востсибэлемент», была обнаружена зона общей площадью 35–40 га со значительно повышенными содержаниями свинца, мышьяка, меди, цинка, никеля [10], расположенная в 200 м к северо-западу от промплощадки завода «Востсибэлемент» и отделенная от последней территорией завода «АкТех» (см. рис. 1). Далее по розе ветров расположено предприятие «ТМ Байкал», занимающееся деревопереработкой. Примерно в то же время аналогичные данные были независимо получены и другими исследователями [11–15].

Интересно, что выявленная зона включает территорию бывшего Ангарского металлургического завода (АМЗ) площадью 13 га, которая являлась объектом накопленного вреда, и была успешно рекультивирована в 2009–2013 гг. [16–19]. Рекультивация проводилась с целью снятия острой социально-экологической проблемы и предполагала последующее использование участка под природоохранные цели с открытым доступом для жителей города, поэтому установление причины возникновения загрязнения на рекультивированной площадке является весьма актуальной задачей. Таким образом, целью данного исследования является детальное изучение выявленной аномалии и попытка реконструкции изменения экологической обстановки на рекультивированной территории бывшей промплощадки АМЗ с помощью данных многолетней космической съемки.

На бывшей промплощадке АМЗ, занимавшегося переработкой арсенопиритовых руд в период с 1934 по 1949 г., в рамках Федеральной целевой программы с 2009 по 2013 гг. проводились работы по проекту «Ликвидация очага загрязнения мышьяком территории промышленной площадки Ангарского металлургического завода в районе г. Свирска Иркутской области». Источниками загрязнения выступали мышьяковистые огарки, строительные конструкции основных цехов завода и загрязненный почвогрунт (рис. 2), расположенные в центральной части промплощадки. В целом территория бывшей промплощадки харак-

теризовалась существенной изменчивостью концентраций приоритетных загрязняющих веществ: от 40 до 9000 мг/кг по мышьяку, от 40 до 18000 мг/кг по свинцу, от 90 до 7300 мг/кг по цинку и от 20 до 3000 мг/кг по меди [16]. Следует отметить, что приведенные концентрации получены в результате пробоотбора по ГОСТ 17.4.3.01-83 «Общие требования к отбору проб», согласно которому минимально допустимое количество проб на территорию в 13 га составляет всего 3 пробы в случае однородного почвенного покрова и 13 проб – в случае неоднородного.

Работы включали в себя экологическую оценку объекта накопленного вреда и разработку технологии его ликвидации, непосредственно обезвреживание и вывоз всех отходов АМЗ за пределы г. Свирска с их дальнейшим захоронением, и проводились в две стадии. Первая стадия осуществлялась в 2012 г. на площади 10,5 га. Наиболее загрязненный почвогрунт с территории в 4,5 га, в том числе с мест размещения особо опасных бывших цехов завода, был обезврежен и вывезен для захоронения на полигон. На этом участке проводилась техническая и биологическая рекультивация с выборкой грунта объемом 9000 м³, завозом условно плодородного грунта в объеме 7700 м³, устройство плодородного слоя почвы мощностью 0,2 м и объемом 3300 м³ с внесением минеральных и органических удобрений, посадкой многолетней травы – овсяницы. Рекультивация на площади 6 га, где размещались почвогрунты периферийных участков промплощадки АМЗ со средней концентрацией мышьяка, сопоставимой со средней концентрацией в селитебной зоне почв г. Свирска (100 мг/кг), по данным Иркутского Центра лабораторного анализа и технических измерений относящиеся к IV классу опасности, заключалась в выборке и планировке почвогрунта участка, срезке насыпей искусственного происхождения в объеме около 2000 м³ и засыпке имеющихся на территории промплощадки выемок⁵ [19].

Вторая стадия рекультивации проводилась в 2013 г. на оставшихся 2,5 га – участке под огарками. Грунт на этой территории после вывозки огарков на полигон выбирался на глубину в среднем от 0,5 до 1,5 м. Затем был завезен условно чистый грунт в размере 30000 т,

⁵ Качор О.Л. Разработка научно-практических основ ликвидации накопленного экологического ущерба от мышьяковистых отходов горно-перерабатывающей промышленности: дис. ... д-ра техн. наук: 25.00.36. Иркутск, 2019. 407 с.



Рис. 2. Расположение отходов (огарки, строительные конструкции) на промплощадке Ангарского металлургического завода на 2009 г.:

1 – контуры бывших корпусов Ангарского металлургического завода; 2 – контуры отвалов (огарков);
3 – рекультивированная территория бывшей промплощадки Ангарского металлургического завода

Fig. 2. Waste location (cinders, wrecks of building structures) at the industrial site of the Angarsk Metallurgical Plant in 2009:

1 – contours of the former buildings of the Angarsk Metallurgical Plant; 2 – dump (cinders) contours;
3 – reclaimed territory of the former industrial site of the Angarsk Metallurgical Plant

после чего – плодородная почва в объеме 5250 т с дальнейшей планировкой участка. После проведения работ были выполнены прикопы рекультивированного участка и отобраны пробы почвы: на отметке 0,9 м расположен первоначальный грунт промплощадки АМЗ, далее идет уплотненный условно плодородный грунт мощностью 0,3–0,4 м, сверху которого находится уплотненный плодородный слой почвы мощностью до 0,2 м (рис. 3)⁵ [19].

По полученным результатам количественного химического анализа, выполненного лабораторией Роспотребнадзора и лабораторией экологического мониторинга природных и техногенных сред Иркутского национального исследовательского технического университета, концентрация мышьяка в почвогрунте рекультивированного участка изменялась от 7,9 до 11 мг/кг.



Рис. 3. Замер глубины траншеи выбираемого почвогрунта с промплощадки Ангарского металлургического завода, 2013 г. (фото авторов)

Fig. 3. Measuring the trench depth of the selected soil from the industrial site of the Angarsk Metallurgical Plant, 2013 (authors' image)



Участки завершенных работ по рекультивации 2012 г., в том числе с мест размещения особо опасных бывших цехов завода площадью в 4,5 га с наиболее загрязненным почвогрунтом, хорошо видны на космоснимках того времени (рис. 4). Также хорошо заметен участок после технической и перед началом биологической рекультивации в 2013 г. (см. светлый участок под бывшим местом расположения огарков на рис. 4).

На основании полученных положительных результатов проведенных мероприятий был оформлен соответствующий акт приемки-сдачи работ по рекультивации промплощадки АМЗ с решением передачи этой территории Комитету по управлению муниципальным имуществом администрации муниципального образования «город Свирск» для дальней-

шего использования под природоохранные и санитарно-гигиенические цели⁵. При этом следует отметить, что речь идет об участке площадью около 13 га, расположенном в пределах крайне неблагоприятной эколого-геохимической обстановки: многими научными коллективами не раз отмечалась необходимость реабилитации всей территории г. Свирска, так как в течение 70-летнего негативного влияния АМЗ токсиканты накопились в объектах окружающей среды всего населенного пункта и продолжают оказывать пагубное воздействие, даже несмотря на ликвидацию промплощадки и проведенную на ней рекультивацию [20–27]. Таким образом, ставший условно чистым участок со всех сторон окружают объекты с отходами вплоть до II степени опасности [9] и действующие промышленные предприятия.



Рис. 4. Космоснимок рекультивированной бывшей промплощадки Ангарского металлургического завода на 2013 г.:

1 – контуры бывших корпусов Ангарского металлургического завода; 2 – рекультивированная территория бывшей промплощадки Ангарского металлургического завода

Fig. 4. A satellite image of the reclaimed former industrial site of the Angarsk Metallurgical Plant in 2013:

1 – contours of the former buildings of the Angarsk Metallurgical Plant; 2 – reclaimed territory of the former industrial site of the Angarsk Metallurgical Plant

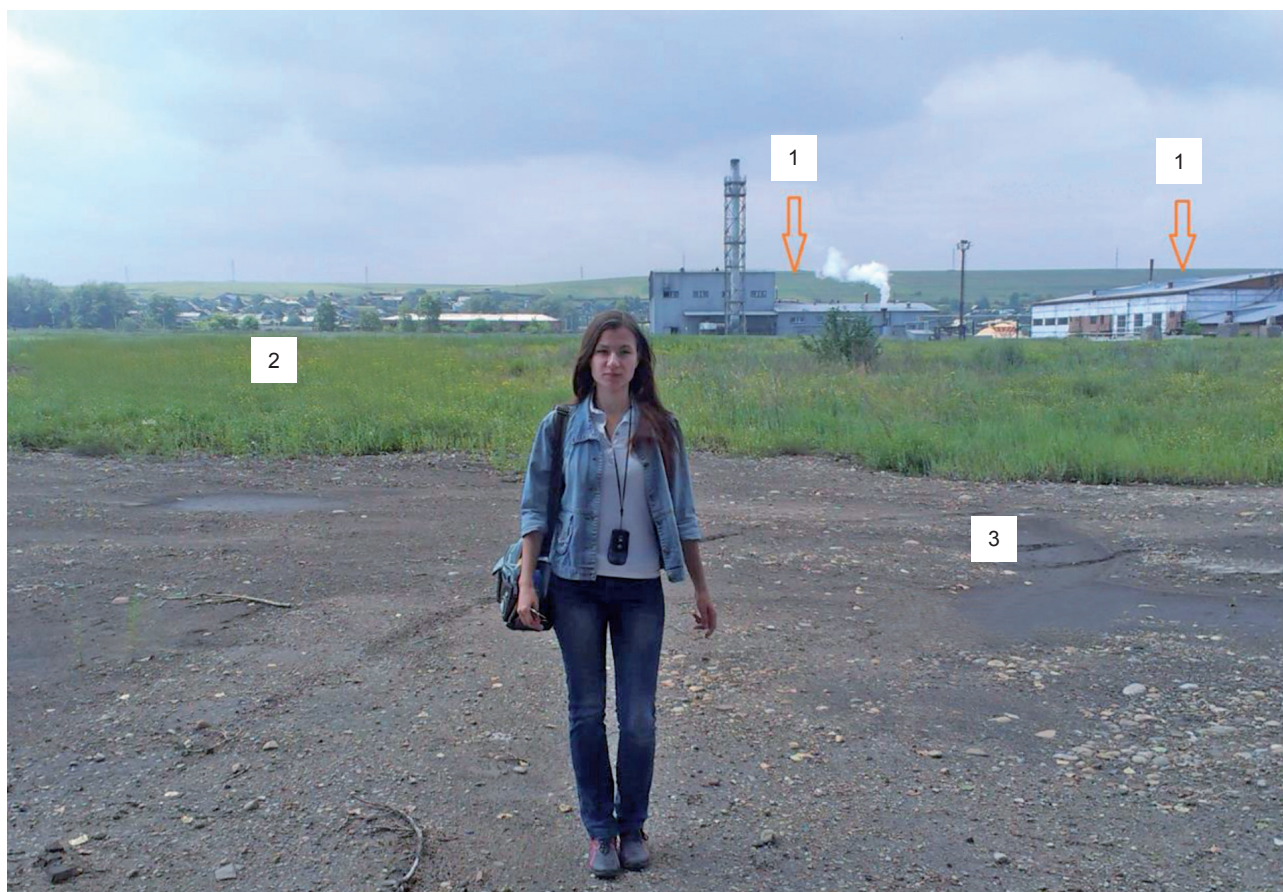


Рис. 5. Фотография с пробоотбора на рекультивированной территории бывшей промплощадки Ангарского металлургического завода, 2016 г. (фото авторов):

1 – предприятие «ТМ Байкал»; 2 – рекультивированная территория; 3 – подъездная дорога
Fig. 5. An image from sampling on the reclaimed territory of the former industrial site of the Angarsk Metallurgical Plant, 2016 (authors' image):
1 – “TM Baikаl” enterprise; 2 – reclaimed area; 3 – access road

Проводимые в 2015–2016 гг. плановые работы по оценке результативности рекультивационных мероприятий с визуальным осмотром территории показали ожидаемое активное зарастание засеянного участка (рис. 5).

Материалы и методы исследования

Эколого-геохимические исследования.

Для изучения актуального геоэкологического состояния участка была проведена площадная геохимическая съемка. Отбор проб почв на территории более 35 га, включая 13 га бывшей промплощадки АМЗ, проводился летом 2022 г. (рис. 6). Принимая во внимание имеющийся опыт исследования сложных природно-антропогенных объектов [9], сеть опробования на рекультивированной территории бывшей промплощадки АМЗ была сгущена в несколько раз относительно рекомендованной государственным стандартом. Всего профилями было отобрано 168 проб почвогрун-

та, сетка отбора проб на территории бывшей промплощадки – 50×50 м, на остальной территории – 100×100 м. Отбор проб для определения концентрации металлов и мышьяка в почвогрунте проводился в соответствии с ГОСТ 17.4.3.01-2017 методом точечной пробы послойно с глубин 0–5 и 5–20 см пластиковыми шпателями, вес каждой пробы составлял около 1 кг.

Пробоподготовка проводилась в соответствии с ГОСТ 17.4.4.02-2017 «Методы отбора и подготовки проб для химического, бактериологического, гельминтологического анализа». Пробы почвогрунта рассыпались на бумаге тонким слоем, из нее выбирали включения (корни растений, камни, стекло и др.) и высушивали на рассеянном свете в хорошо вентилируемом помещении до воздушно-сухого состояния. При этом распределяли почвогрунт слоем не более 5 см. Далее пробы растирались в ступке пестиком и просеивались через сито с диаметром отверстий 1 мм. Для опреде-



Рис. 6. Карта проботбора почв на территории к северо-западу от завода «Востсибэлемент», включая рекультивированную территорию бывшей промплощадки Ангарского металлургического завода:

1 – точки отбора проб; 2 – исследованная территория; 3 – рекультивированная территория бывшей промплощадки Ангарского металлургического завода; 4 – садоводства; 5 – территория завода «АкТех»; 6 – территория предприятия «ТМ Байкал»; 7 – прочие промышленные территории

Fig. 6. A map of soil sampling in the area to the northwest from the Vostsibelelement plant including the reclaimed area of the former industrial site of the Angarsk Metallurgical Plant:

1 – sampling points; 2 – explored area; 3 – reclaimed territory of the former industrial site of the Angarsk Metallurgical Plant; 4 – horticultural cooperatives; 5 – AkTech plant territory; 6 – “TM Baikalsk” enterprise territory; 7 – other industrial areas

ления валового содержания тяжелых металлов и мышьяка из просеянной пробы отбирали представительную пробу массой не менее 20 г методом квартования: проба почвогрунта тщательно перемешивалась, распределялась тонким слоем на бумаге, делилась на четыре равные части. Две части из четырех по диагонали объединялись, две другие отбрасывались. Данную процедуру повторяли до получения требуемого количества почвы. Подготовленная данным образом проба истиралась в ступке до пудрообразного состояния.

Из каждой пробы для уменьшения влияния случайных ошибок были изготовлены три порошкообразных образца, которые помещались в специальные кюветы для определения концентрации тяжелых металлов и мышьяка.

Количественный химический анализ проб проводился по ГОСТ 33850-2016. Для повышения оперативности и детальности оценки состояния почв использовался неструктив-

ный химический анализ методом рентгенофлуоресцентной спектрометрии с использованием портативного анализатора SciAps серии «X200 Geochemistry» в режиме «Почва». Такой подход позволяет получать химико-аналитические данные высокого качества с низкими затратами, что увеличивает плотность сетей проботбора при проведении инициативных исследований, не обеспеченных значительным финансированием [28–31].

Дистанционное зондирование земли. Геохимическое опробование позволяет изучить современное геоэкологическое состояние промплощадки, но не позволяет исследовать процесс его становления. Поэтому для изучения процессов, которые происходили на объекте с момента начала мероприятий по рекультивации и до современного (на 2023 г.) состояния, применялся анализ данных мультиспектрального спутникового дистанционного зондирования Земли, который позволяет получить прямые и косвенные данные о территории с временным разрешением от 1 до 10 снимков каждый месяц, в зависимости от погоды и используемой группировки спутников.

Для анализа изменений обстановки на промплощадке в данной работе представлены картограммы научно-обоснованного показателя NDVI (нормализованный вегетационный индекс растительности) – простого показателя количества фотосинтетически активной биомассы. Данный показатель в определенной точке снимка рассчитывается как разница интенсивностей отраженного света в красном и инфракрасном диапазоне спектра электромагнитного излучения, деленная на сумму их интенсивностей ($NDVI = (NIR - RED) / (NIR + RED)$). В красной области спектра (0,6–0,7 мкм) лежит максимум поглощения солнечной радиации хлорофиллом высших сосудистых растений, а в инфракрасной области (0,75–1 мкм) находится область максимального отражения клеточных структур листа. То есть высокая фотосинтетическая активность (связанная, как правило, с густой растительностью) ведет к меньшему отражению в красной области спектра и большему – в инфракрасной. Отношение этих показателей друг к другу позволяет четко отделять и анализировать растительные от прочих природных объектов. Использование же не простого отношения, а нормализованной разности между минимумом и максимумом



Таблица 1. Используемые спутниковые системы и их характеристики
Table 1. Used satellite systems and their characteristics

Спутник	Период, г.	Разрешение снимков (мультиспектр), м	Красный канал, нм	Ближний инфракрасный канал, нм
Landsat 7	До 2013	30	0,631–0,692	0,772–0,898
Landsat 8	2013–2017	30	0,636–0,673	0,851–0,879
Sentinel-2	2017–2022	10	665 (центр)	842 (центр)

отражений увеличивает точность измерения, позволяет уменьшить влияние таких явлений, как различия в освещенности снимка, облачности, дымки, поглощение радиации атмосферой и пр. [32].

Большинство спутниковых систем имеют соответствующие спектральные каналы в красном и инфракрасном диапазоне, что позволяет получать сопоставимые картографические материалы даже в случаях, когда весь временной промежуток исследования не обеспечен данными единой системы наблюдений, то есть как в нашем случае: до 2013 г. из открытых и бесплатных источников данных дистанционного зондирования Земли для нас были доступны материалы радиометра Landsat ETM+ (Landsat-7), однако с 2003 г. этот спутник функционировал в аварийном режиме и имел определенные проблемы с данными. В мае 2013 г. (уже после завершения рекультивации) на орбиту вышел следующий спутник программы – Landsat 8, характеризующийся сходными оптическими и радиометрическими параметрами (табл. 1). С 2017 г. стали доступны данные втрое более высокого пространственного разрешения программы Sentinel-2. В целом на период с 2009 по 2023 г. применялись данные спутниковых систем, отображенные в табл. 1.

Следует отметить, что индекс NDVI имеет достаточно стандартизованную классификацию, позволяющую не только относительно оценивать количество фотосинтезирующей биомассы, но и определять тип поверхности (табл. 2), что вполне соответствует задаче данного исследования, поскольку позволяет легко выявить нарушения растительного покрова, снятие почвенного слоя или аномально хорошее или аномально плохое развитие растительности в течение сезона. Такие косвенные индикаторы безусловно будут сопровождать и маркировать ведущую хозяйственную деятельность – как позитивную, так и негативную, а отсутствие заметного влияния на участок можно будет зафиксировать по синхронному с фоновыми участками развитию растительного покрова.

Таблица 2. Стандартная классификация картограмм NDVI
Table 2. Standard classification of NDVI index maps

Тип объекта	Значение NDVI
Густая растительность	0,7
Разреженная растительность	0,5
Открытая почва	0,025
Облака	0
Снег и лед	-0,05
Вода	-0,25
Искусственные материалы (бетон, асфальт)	-0,5

В отношении последней упомянутой позиции следует дополнительно отметить, что напрямую сравнивать между собой снимки с разных радиометров на полностью количественном уровне методологически не вполне корректно (например, июль 2013 г. и июль 2017 г.), поскольку, как видно из табл. 1, для расчета параметра используются несколько разные спектральные окна, сами снимки могут приходиться на различные дни месяца, и климатическая обстановка в различные годы также неодинакова. Поэтому в данной статье картограммы NDVI даются в непрерывных легендах одной цветовой шкалы, а акцент делается на сопоставлении обстановки на площадке с обстановкой на фоновых участках с нормально растущей растительностью в соседних садоводствах, лесах, парках.

Результаты исследования и их обсуждение

На рис. 7–9 представлены карты распределения содержаний свинца, мышьяка и цинка на исследуемой территории. В большинстве проб почвогрунта зафиксировано превышение концентрации мышьяка относительно ОДК 10 мг/кг (СанПиН 1.2.3685-21 «Гигиенические нормативы и требования к обеспечению безопасности и (или) безвредности для человека факторов среды обитания» (с изменениями на 30 декабря 2022 г.), в отдельных пробах отмечается превышение норматива в сотни раз. Содержания свинца (ОДК 130 мг/кг) в отдельных пробах превышает установленный норматив до сотни раз, меди (ОДК 132 мг/кг) и цинка (ОДК 55 мг/кг) в десятки раз.

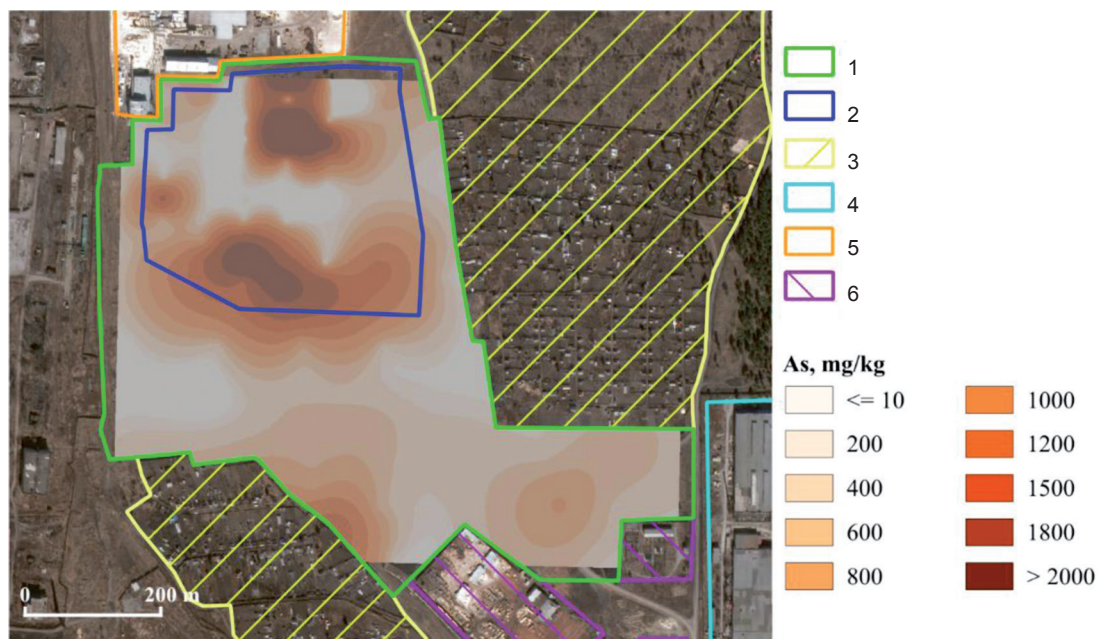


Рис. 7. Карта распределения валового содержания мышьяка на изучаемой территории (в горизонте 0–5 см):

1 – исследованная территория; 2 – рекультивированная территория бывшей промплощадки Ангарского металлургического завода; 3 – садоводства; 4 – территория завода «АкТех»; 5 – территория предприятия «ТМ Байкал»; 6 – прочие промышленные территории

Fig. 7. Distribution map of gross arsenic content in the area under investigation (in the horizon from 0 to 5 cm):

1 – explored area; 2 – reclaimed territory of the former industrial site of the Angarsk Metallurgical Plant; 3 – horticultural cooperatives; 4 – AkTech plant territory; 5 – “TM Baikal” enterprise territory; 6 – other industrial areas

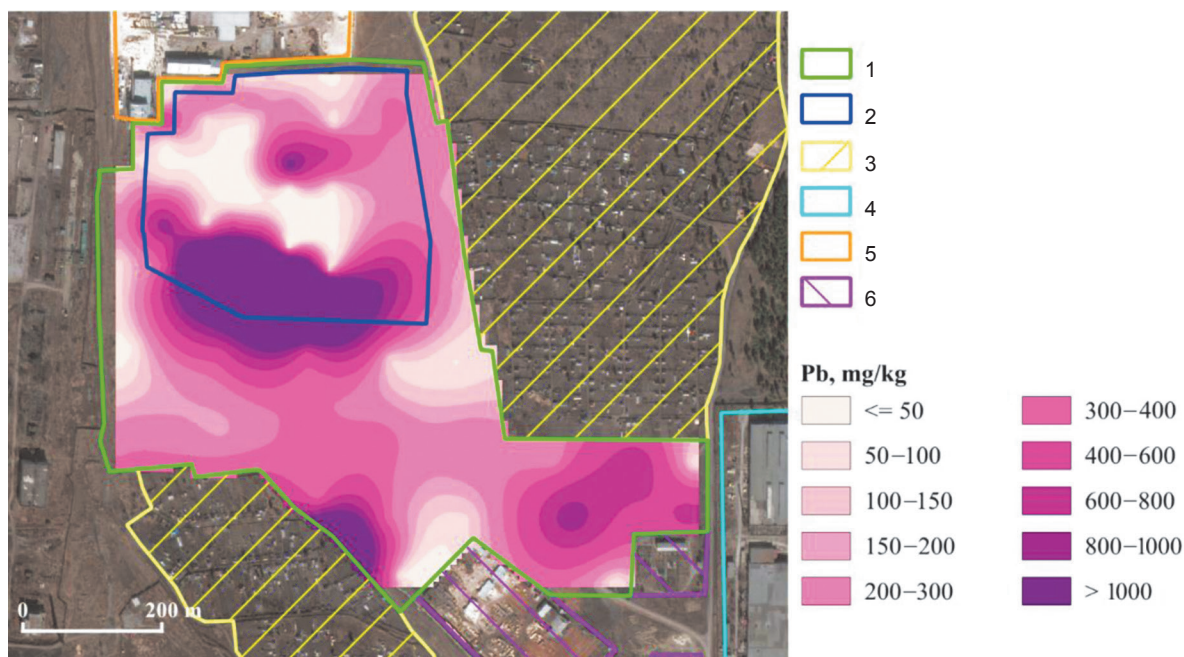


Рис. 8. Карта распределения валового содержания свинца на изучаемой территории (в горизонте 0–5 см):

1 – исследованная территория; 2 – рекультивированная территория бывшей промплощадки Ангарского металлургического завода; 3 – садоводства; 4 – территория завода «АкТех»; 5 – территория предприятия «ТМ Байкал»; 6 – прочие промышленные территории

Fig. 8. Distribution map of gross lead content

in the area under investigation (in the horizon from 0 to 5 cm):

1 – explored area; 2 – reclaimed territory of the former industrial site of the Angarsk Metallurgical Plant; 3 – horticultural cooperatives; 4 – AkTech plant territory; 5 – “TM Baikal” enterprise territory; 6 – other industrial areas



Рис. 9. Карта распределения валового содержания цинка на изучаемой территории (в горизонте 0–5 см):

1 – исследованная территория; 2 – рекультивированная территория бывшей промплощадки Ангарского металлургического завода; 3 – садоводства; 4 – территория завода «АкТех»; 5 – территория предприятия «ТМ Байкал»; 6 – прочие промышленные территории

Fig. 9. Distribution map of gross zinc content in the area under investigation (in the horizon from 0 to 5 cm):

1 – explored area; 2 – reclaimed territory of the former industrial site of the Angarsk Metallurgical Plant; 3 – horticultural cooperatives; 4 – AkTech plant territory; 5 – “TM Baikal” enterprise territory; 6 – other industrial areas

Как видно из рис. 7 и 8, ореолы распространения содержаний мышьяка и свинца имеют схожий характер и в границах бывшей промплощадки АМЗ относятся к ее периферийным участкам, на которых по проекту рекультивации не был предусмотрен вывоз грунта и завоз плодородного слоя, поскольку концентрации загрязняющих веществ по данным опережающего опробования соответствовали средним концентрациям в почвах селитебной зоны г. Свирска, имела аборигенная растительность, и они были оставлены под самозаращение (см. рис. 2).

Как и следовало ожидать, наиболее чистые участки в границах промплощадки точно повторяют контуры территории в 2,5 га, на которой проходили наиболее масштабные работы по рекультивации с выборкой грунта на глубину от 0,5 до 1,5 м, завозом условно плодородной почвы и высеванием многолетней травы. До реализации проекта здесь были локализованы основные ореолы свинцового и цинкового загрязнения, что вполне логично объясняется химическим составом исходной руды, включающей в себя как арсенопирит, так и галенит и сфалерит [33, 34].

Следует отметить, что работы по госконтракту не предусматривали детальных обследований площади за пределами промплощадки, поэтому исходную ситуацию по уровню ее загрязнения установить сложно. Однако, как мы видим из рис. 7–9, даже использованная нами сеть 100×100 м не позволяет считать полученную эколого-геохимическую картину загрязнения этого участка достоверной ввиду крайней неравномерности выявленных аномалий.

Кроме того, в результате визуальных наблюдений на территории промплощадки выявлены зоны захламления отходами различного происхождения: строительные, лесопереработки и т. д. (рис. 10).

Эти новые зоны захламления также визуально выделяются и на современных космоснимках (рис. 11), на данных прошлых лет (см. рис. 4) они отсутствуют. Однако местоположение данных отходов не в полной мере совпадает с обнаруженными наиболее интенсивными ореолами концентраций основных загрязняющих веществ (см. рис. 7–9), по всей видимости они не являются приоритетными источниками загрязнения мышьяком и тяжелыми металлами.



Рис. 10. Отходы неустановленного происхождения на бывшей промплощадке Ангарского металлургического завода, 2022 г. (фото авторов)
Fig. 10. Waste of unknown origin at a former industrial site of the Angarsk Metallurgical Plant, 2022 (authors' image)



Рис. 11. Расположение отходов неустановленного происхождения на рекультивированной территории бывшей промплощадки Ангарского металлургического завода (космоснимок, 2020 г.):
1 – границы рекультивированной территории бывшей промплощадки Ангарского металлургического завода; 2 – контуры бывших корпусов Ангарского металлургического завода; 3 – отходы
Fig. 11. Location of waste of unknown origin on the reclaimed territory of the former industrial site of the Angarsk Metallurgical Plant (space image, 2020):
1 – boundaries of the reclaimed territory of the former industrial site of the Angarsk Metallurgical Plant factory; 2 – contours of the former buildings of the Angarsk Metallurgical Plant; 3 – waste



В связи с полученными геохимическими данными неизбежно возникает вопрос о том, были ли выполнены все предусмотренные проектом рекультивационные мероприятия в полном объеме, либо же произошло значительное вторичное загрязнение изучаемой территории. В обоих случаях произвести ретроспективный анализ позволяют данные многолетней мультиспектральной спутниковой съемки. Например, индекс биомассы растительности NDVI научно-обоснованно показывает характер поверхности (почва, вода, техногенные объекты, трава, кустарниковая растительность и так далее) и позволяет оценить динамику изменений [35–38].

Ниже приведены картограммы индекса NDVI по годам с момента начала проведения рекультивации по 2022 г. (момент отбора проб почв). Представленные в статье карты относятся к середине июля.

Как видно из рис. 12, на территории промплощадки АМЗ в ходе проведения работ по рекультивации со снятием загрязненного грунта и завозом плодородной почвы (2012–2013 гг.) зеленая биомасса еще отсутствует, что соответствует проектным условиям.

В 2014 г. (рис. 13) явно выделяется участок, на котором биомасса растительности значительно выше, чем в среднем по исследуемому

району, включая садоводства. Действительно, этот участок относится к территории с максимально масштабными работами по рекультивации – подогарочная зона с выемкой загрязненного грунта до 1,5 м, завозом плодородной почвы в максимальном объеме относительно остальной промплощадки, внесением минеральных и органических удобрений, засевом наиболее подходящей (выбранной Сибирским институтом физиологии и биохимии растений СО РАН) многолетней травы. Результаты спутниковых наблюдений показывают, что эти мероприятия привели к очевидному эффекту. В то же время на участках, оставленных под самозаращение, отмечается медленная антропогенная сукцессия.

Спустя несколько лет (см. 2016 и 2017 гг. на рис. 13) биомасса растительности выравнивается по всей территории промплощадки: по всей видимости, на всем участке теперь произрастают одинаковые виды растительности. Однако, как видно из картограмм, на некоторых локальных участках самозаращение идет медленнее. Это участки под бывшим цехом автоспецоборудования и южной окраиной промплощадки, где значительные строительные конструкции и отвалы огарков отсутствовали, в связи с чем до начала работ по проекту в целом отмечались сопоставимые со сред-

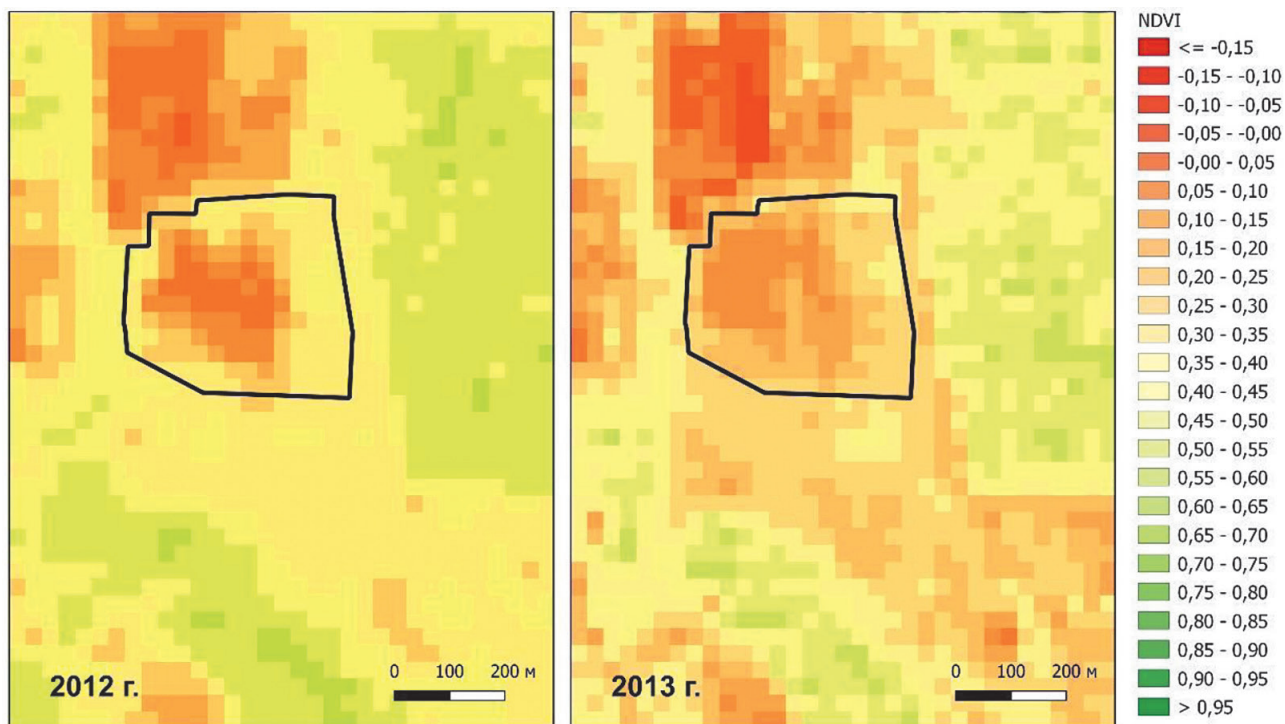


Рис. 12. Картограммы индекса NDVI для изучаемого района, включая рекультивированную территорию бывшей промплощадки Ангарского металлургического завода в 2012 и 2013 гг.
Fig. 12. NDVI index maps for the area under investigation including the reclaimed territory of the former industrial site of the Angarsk Metallurgical Plant in 2012 and 2013

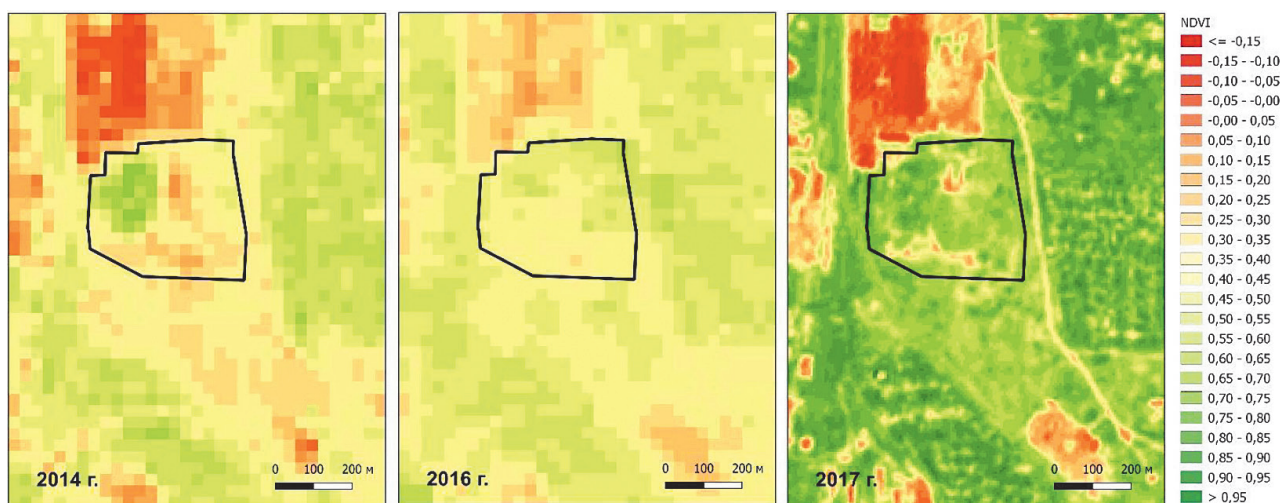


Рис. 13. Картограммы индекса NDVI для изучаемого района, включая рекультивированную территорию бывшей промплощадки Ангарского металлургического завода в 2014, 2016 и 2017 гг.

Fig. 13. NDVI index maps for the area under investigation including the reclaimed territory of the former industrial site of the Angarsk Metallurgical Plant in 2014, 2016 and 2017

ним содержанием по г. Свирску концентрации загрязняющих веществ, выемка грунта и завоз плодородной почвы не производилась.

Данные последних лет (начиная с 2017 г.) получены Sentinel-2 и имеют более высокое пространственное разрешение, однако это не влияет на результаты интерпретации спутниковых снимков, поскольку в первую очередь мы сравниваем характер растительности на промплощадке с растительностью в садоводствах. Видно, что и в 2016, и в 2017 г. значения параметра NDVI на территории промплощадки и на территориях садоводств, на которых происходит регулярное вмешательство человека в отношении улучшения продуктивности биомассы, примерно аналогичны, что сви-

детельствует о благоприятных абиотических факторах на территории бывшей промплощадки.

В 2019 г. и в последующие годы при сопоставлении биомассы в границах промплощадки и биомассы садоводств ситуация на промплощадке принципиально не меняется (рис. 14). По всей видимости эколого-геохимическая и геоботаническая ситуация остается неизменной, что не свидетельствует в пользу значительных вторичных техногенных воздействий, связанных с серьезными вмешательствами, например, с завозом или снятием грунта.

В результате применения комплекса геохимических и спутниковых исследований

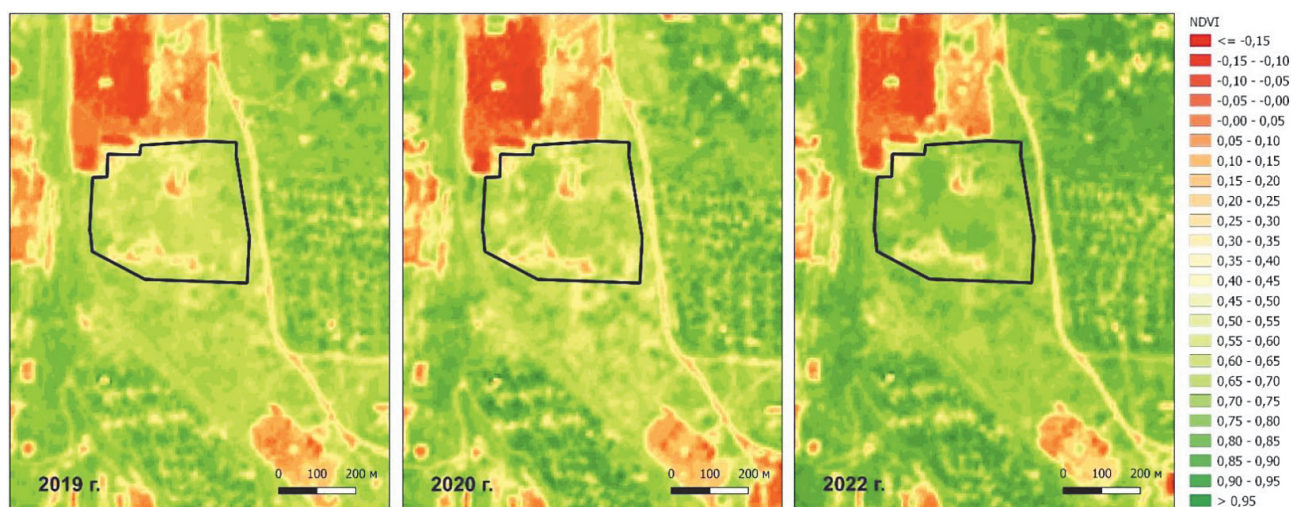


Рис. 14. Картограммы индекса NDVI для изучаемого района, включая рекультивированную территорию бывшей промплощадки Ангарского металлургического завода в 2019, 2020 и 2022 гг.

Fig. 14. NDVI index maps for the area under investigation including the reclaimed territory of the former industrial site of the Angarsk Metallurgical Plant in 2019, 2020 and 2022



получены противоречивые выводы. С одной стороны, аномальное текущее состояние промплощадки несомненно, с другой стороны, анализ спутниковых данных убедительно фиксирует как весь ход рекультивации, так и ее положительные результаты, проявляющиеся в том числе в характере изменений растительного покрова. И при этом по спутниковым данным мы не видим какого-либо масштабного вмешательства в обстановку на площадке с момента завершения работ по рекультивации.

Полученные данные свидетельствуют скорее о возможной недооцененности загрязнения периферийных участков промплощадки и смежных с ними частей площади, что вполне возможно из-за хаотичного характера загрязнений, высокой изменчивости концентраций и сомнительной возможностью адекватной характеристики эколого-геохимической обстановки по стандартной сети опробования, особенно в связи отсутствием каких-либо предпосылок для подозрений о наличии значимых аномалий на этой территории (деятельность завода данную территорию не затрагивала). На рис. 15 приведены два варианта оценки эколого-геохимического состояния 13 га промплощадки по соответствующей государственному стандарту сети из 13 точек, полученные

на основе двух выборок из всего массива отобранных проб. Как можно заметить, результаты оценки отличаются принципиально.

Представленные на рис. 15 результаты наилучшим образом визуализируют тезис о необходимости применения для геоэкологического изучения подобных сложных объектов плотных некондиционных сетей пробоотбора вплоть до 25×25 м. Даже с нашей гораздо более детальной съемкой (50×50 м) выявленные аномалии по обе границы бывшей промплощадки обнаруживают лишь единичные, но значительно повышенные концентрации загрязняющих веществ, полностью выявить которые при стандартной съемке 100×100 м представляется маловероятным. В связи с тем, что за границами промплощадки мы также использовали стандартизованную сеть 100×100 м, велика вероятность промаха в выявлении точечных загрязнений на сопряженной территории и «размазывании» выявленных ореолов загрязнений. Однако из полученных данных очевидно, что вся неосвоенная территория представляет собой особую зону антропогенного влияния различного характера и всю ее необходимо подвергнуть детальной съемке.

Таким образом, одной из причин возникновения наблюдаемых в настоящее время

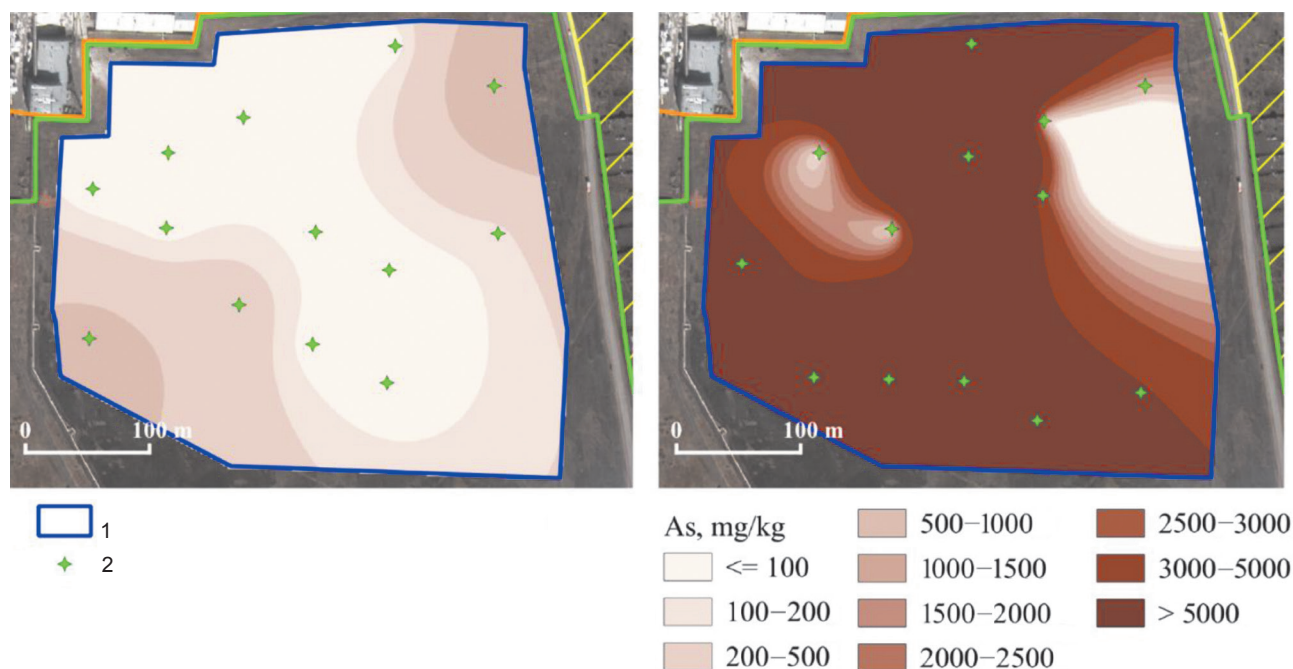


Рис. 15. Картограммы распределения мышьяка на участке по результатам двух различных выборок:
1 – рекультивированная территория бывшей промплощадки Ангарского металлургического завода;
2 – выбранные для расчета точки

Fig. 15. Interpretative maps of arsenic distribution at the site based on the results of two different samples:
1 – reclaimed territory of the former industrial site of the Angarsk Metallurgical Plant;
2 – points selected for calculation



ореолов загрязнения токсикантами могли послужить единичные точечные концентрации загрязняющих веществ по обе стороны условной границы промплощадки АМЗ, которые за последние 10 лет диффундировали в более чистые зоны после проведения мероприятий по рекультивации территории, и вполне вероятно, что при отсутствии соответствующих мероприятий по ремедиации всех сопряженных территорий, со временем они распространятся и на всю ранее рекультивированную территорию бывшей промплощадки АМЗ, приведя к усреднению концентраций токсикантов по всей обследованной территории. Кроме того, следует учесть наличие, но невозможно оценить степень влияния на участок параллельно идущего мягкого (постепенного) вторичного загрязнения промплощадки с сопряженных территорий, которые характеризуются высоким загрязнением мышьяком и тяжелыми металлами. Имеющиеся у нас данные говорят о том, что такой перенос объективно существует как с ветровой эрозией [10], так и в результате миграции с ближайших загрязненных участков. Кроме того, химический состав верхнего слоя загрязненной почвы на изучаемой территории в целом сопоставим с геохимической специализацией загрязнения грунта на близрасположенной промплощадке завода «Востсибэлемент», на которой к тому же ведется активная деятельность по разбору зданий и сооружений и выемке металлоконструкций, что ведет к значительному повышению, например, пылепереноса.

В пользу предложенной гипотезы о причинах и механизмах формирования современной геохимической обстановки на участке свидетельствует то, что долговременное постепенное загрязнение не должно было явным образом проявиться в данных дистанционного зондирования Земли, но косвенным проявлением было бы как раз наблюдаемое постепенное подавление аборигенной растительностью специально высаженной при рекультивации травы, которая вряд ли успела бы адаптироваться к существенному негативному изменению геохимической обстановки.

Заключение

Таким образом, полученные данные не позволяют точно установить причину аномального загрязнения, но позволяют обоснованно отвергнуть сразу обе базовые гипотезы исследования, которые представлялись взаимоисключающими: и о невыполненной рекультивации, и о вторичном загрязнении в результате направленного антропогенного воздействия. Созданные информационно-картографические материалы дают новую информацию о эколого-геохимической обстановке на изучаемом участке, но несмотря на достаточно плотную сеть геохимических исследований все равно представляются авторам нуждающимися в дополнительном уточнении. Важным фактором успешности исследования является количественный XRF-анализ с помощью мобильной аппаратуры, поскольку проведение тысяч элементопределений для сотен проб в рамках по существу студенческих исследований, не обеспеченных значительным финансированием, было бы невозможным.

Для однозначного понимания сложившейся ситуации и достоверного установления вероятного источника (или источников) вторичного загрязнения необходимо провести комплексные инженерно-исследовательские работы по детальным сетям пробоотбора не хуже 25×25 м, включающие как полномасштабные дорогостоящие аналитические исследования, например, рентгеноструктурный анализ, так и комплекс технологических работ, включающий в том числе бурение. Однако проведение такого комплекса работ в рамках инициативных научных исследований является невозможным, в том числе и по юридическим причинам. В то же время предложенная методология изучения современного геохимического состояния и ретроспективного изучения изменения ситуации в прошлом позволила с незначительными затратами и при этом вполне обоснованно получить новую социально значимую информацию и позволяет разработать наиболее рациональный план дальнейшего изучения участка.

Список источников

1. Петрова А.С. Реализация экологических проектов Госкорпорацией «Росатом» // Теоретическая и прикладная экология. 2023. № 4. С. 28–34. <https://doi.org/10.25750/1995-4301-2023-4-028-034>. EDN: LQZLNV.
2. Ашихмина Т.Я., Скугорева С.Г., Адамович Т.А., Товстик Е.В. Оценка состояния поверхностных водных объектов в районе полигона захоронения ядохимикатов // Теоретическая и прикладная экология. 2021. № 1. С. 104–111. <https://doi.org/10.25750/1995-4301-2021-1-104-111>. EDN: YEGIGM.



3. Дрегуло А.М., Родионов В.З. «Горячие точки» ХЕЛКОМ: животноводческий комплекс «Пашский» как объект накопленного вреда окружающей среде // Теоретическая и прикладная экология. 2020. № 4. С. 49–54. <https://doi.org/10.25750/1995-4301-2020-4-049-054>. EDN: FSHOOV.
4. Кондакова Л.В., Безденежных К.А., Ашихмина Т.Я. Альгологический анализ состояния почв в районе объекта «Марадыковский» после прекращения его функционирования // Теоретическая и прикладная экология. 2019. № 1. С. 23–29. <https://doi.org/10.25750/1995-4301-2019-1-023-029>. EDN: ZSJTTV.
5. Кузьмин М.И., Тарасова Е.Н., Мамонтова Е.А., Мамонтов А.А., Хомутова М.Ю. Воздействие сточных вод и атмосферных выбросов Байкальского целлюлозно-бумажного комбината (БЦБК) на озеро Байкал // Ученые записки Российского государственного гидрометеорологического университета. 2013. № 28. С. 51–57. EDN: QJINMV.
6. Nikanorov A.M., Reznikov S.A., Matveev A.A., Arakelyan V.S. Monitoring of polycyclic aromatic hydrocarbons in the Lake Baikal basin in the areas of intensive anthropogenic impact // Russian Meteorology and Hydrology. 2012. Vol. 37. Iss. 7. P. 477–484. <https://doi.org/10.3103/S1068373912070072>. EDN: RFZUXT.
7. Руш Е.А. Ртутное загрязнение р. Ангара в зоне действия химического комбината // Водоснабжение и санитарная техника. 2003. № 11. С. 21–24. EDN: PXIEQX.
8. Якимова Н.Л., Соседова Л.М. Ретроспективный анализ ртутного загрязнения производственной среды в цехах ОАО «Усольехимпром» и «Саянскимпласт» // Бюллетень Восточно-Сибирского научного центра Сибирского отделения Российской академии медицинских наук. 2009. № 5-6. С. 71–74. EDN: LLWIKL.
9. 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.
10. 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 рос. науч.-практ. конф. с междунар. участием (г. Киров, 30 ноября 2022 г.). Киров: Изд-во ВятГУ, 2022. С. 247–250. EDN: ODGNBY.
11. Баенгуев Б.А., Белоголова Г.А. Эколого-геохимическая оценка соединений мышьяка и свинца в техногенной почве г. Свирска // Современные направления развития геохимии: материалы рос. конф. (с участием зарубежных ученых) (г. Иркутск, 21–25 ноября 2022 г.). Иркутск: Изд-во ИГ СО РАН, 2022. С. 45–48. EDN: RCFLSB.
12. Шаяхметов С.Ф., Меринов А.В., Меринов А.В., Журба О.М. Анализ распределения и накопления подвижных форм тяжелых металлов и мышьяка в почвах урбанизированной территории г. Свирска (Иркутская область) // Экология и промышленность России. 2023. Т. 27. № 9. С. 56–60. <https://doi.org/10.18412/1816-0395-2023-9-56-60>. EDN: UYGORC.
13. Баенгуев Б.А., Белоголова Г.А. Оценка загрязнения техногенных почв мышьяком в г. Свирске после ликвидации Ангарского металлургического завода // Строение литосферы и геодинамика: материалы XXIX рос. молодежн. конф. (г. Иркутск, 11–16 мая 2021 г.). Иркутск: Изд-во ИЗК СО РАН, 2021. С. 17–18. EDN: ZXGWJJ.
14. 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.
15. Баенгуев Б.А., Белоголова Г.А. Содержание мышьяка в почве на территории бывшего Ангарского металлургического завода г. Свирска после рекультивации нарушенных земель // Байкальская молодежная научная конференция по геологии и геофизике: материалы VI рос. молодежн. науч. конф. (г. Улан-Удэ, 23–27 августа 2021 г.). Улан-Удэ: Изд-во БНЦ СО РАН, 2021. С. 8–10. <https://doi.org/10.31554/978-5-7925-0604-6-2021-8-10>. EDN: JTUFEU.
16. Богданов А.В., Качор О.Л. Технология переработки отвалов пиromеталлургического производства // Известия высших учебных заведений. Горный журнал. 2010. № 5. С. 136–144. EDN: OJDFDZ.
17. Качор О.Л., Сидоров И.М., Чайка Н.В., Шатрова А.С. Мониторинг загрязнений снежного покрова района МО «город Свирск» // Вестник Иркутского государственного технического университета. 2013. № 10. С. 82–86. EDN: RGSXNR.
18. Богданов А.В., Качор О.Л., Абарина Н.Г. Обезвреживание мышьяксодержащих отходов горно-металлургической промышленности // Российский химический журнал. 2013. Т. 57. № 1. С. 75–78. EDN: UGDOUL.
19. Богданов А.В., Качор О.Л., Федотов К.В., Чайка Н.В. Ликвидация последствий деятельности мышьяково-го производства горно-перерабатывающей промышленности // Экология и промышленность России. 2014. № 5. С. 31–35. EDN: SCDGJB.
20. Кузьмина О.В., Пройдакова О.А., Янчук Т.М. Оценка степени загрязнения тяжелыми металлами компонентов природной среды г. Свирска (Иркутская область) // Известия Иркутского государственного университета. Серия: Биология. Экология. 2015. Т. 11. С. 81–92. EDN: TSXKOZ.
21. Гребенщикова В.И., Кузьмин М.И., Дорошков А.А. Эколого-геохимические особенности городских экосистем Прибайкалья // Проблемы устойчивого развития региона: IX школа-семинар молодых ученых России, посвященная 70-летию академика РАН Арнольда Кирилловича Тулохонова (г. Улан-Удэ, 03–07 июля 2019 г.). Улан-Удэ, 2019. С. 99–101.
22. Качор О.Л., Чайка Н.В., Бальчинова Я.Э. Рекультивация земель, загрязненных мышьяком и тяжелыми металлами в МО «г. Свирск» // Образование России и актуальные вопросы современной науки: сб. ст. Всерос. науч.-практ. конф. (г. Пенза, 13–14 июня 2018 г.). Пенза: Изд-во ПГАУ, 2018. С. 145–151. EDN: XZWPTV.
23. Бутырин М.В., Замашиков Р.В., Хуснидинов Ш.К. Оценка степени загрязнения природной среды, сельскохозяйственных растений и показатели здоровья населения г. Свирска Иркутской области // Вестник ИргХСА. 2015. № 67. С. 17–24. EDN: TYCLBH.



24. Меринов А.В., Алексеенко А.Н., Шаяхметов С.Ф., Журба О.М. Оценка содержания тяжелых металлов и полициклических ароматических углеводородов в почве г. Свирска Иркутской области // Гигиена и санитария. 2022. Т. 101. № 9. С. 1018–1022. <https://doi.org/10.47470/0016-9900-2022-101-9-1018-1022>. EDN: DIEVTH.
25. Grebenshchikova V.I., Efimova N.V., Doroshkov A.A. Chemical composition of snow and soil in Svirsk city (Irkutsk Region, Pribaikal'e) // Environmental Earth Sciences. 2017. Vol. 76. Iss. 20. P. 712. <https://doi.org/10.1007/s12665-017-7056-0>. EDN: ZTKBBX.
26. Кузьмина О.В., Димова Л.М., Янчук Т.М. Анализ загрязнения среды г. Свирска (Иркутской области) тяжелыми металлами с использованием метода географических информационных систем (ГИС) // Вопросы естествознания. 2014. № 2. С. 12–18. EDN: SNGFDT.
27. Богданов А.В., Качор О.Л., Шатрова А.С., Чайка Н.В. Рекультивация земель, загрязненных отходами горно-перерабатывающей промышленности с использованием отходов целлюлозно-бумажной промышленности // Известия Сибирского отделения секции наук о Земле Российской академии естественных наук. Геология, поиски и разведка рудных месторождений. 2016. № 2. С. 96–102. <https://doi.org/10.21285/0301-108X-2016-55-2-96-102>. EDN: WAXNER.
28. Uvarova Yu.A., Baensch A.T., Verrall M., Cleverley J.S. Coupled XRF and XRD analyses for rapid and low-cost characterization of geological materials in the mineral exploration and mining industry // Explore. Newsletter for the Association of Applied Geochemists. 2014. Iss. 162. P. 1–14.
29. Sarala P., Koskinen H. Application of the portable X-Ray Diffraction (pXRD) analyser in surficial geological exploration // Geologi. 2018. Vol. 70. P. 58–68.
30. González S.G., Cuervo V.G. Geotechnologies XRF and LIBS portable useful to characterize oil seep and oil-show drilling. 2018. 10 p.
31. Демьянюк К.В., Хабеева Д.А., Бутакова Е.С., Качор О.Л. Оценка экологического состояния промплощадки бывшего завода «Востсибэлемент» // Перспективы развития горно-металлургической отрасли (Игошинские чтения): материалы рос. науч.-практ. конф. (г. Иркутск, 26 ноября 2021 г.). Иркутск: Изд-во ИРНИТУ, 2021. С. 71–75. EDN: JLZOBQ.
32. Дубинин М. NDVI – теория и практика // GIS-Lab. 2002. Режим доступа: <https://gis-lab.info/qa/ndvi.html> (дата обращения: 20.12.2023).
33. Раков Л.Т., Прокофьев В.Ю., Зорина Л.Д. Элементы-примеси в кварце месторождений золота Дарасунского рудного поля (Восточное Забайкалье, Россия): данные электронного парамагнитного резонанса // Геология рудных месторождений. 2019. Т. 61. № 2. С. 72–92. <https://doi.org/10.31857/S0016-777061272-92>. EDN: PXUDXP.
34. Михайлова О.С., Булаева Н.М., Мусихина Е.А. Мониторинг загрязнения тяжелыми металлами почвенного покрова территории города Свирска // Мониторинг. Наука и технологии. 2014. № 4. С. 34–40. EDN: TDXDAB.
35. Ульянцева Ю.О. Об использовании космических изображений при изучении биомассы и продуктивности растительных сообществ в Крыму // Геополитика и экогеодинамика регионов. 2015. Т. 1. № 4. С. 61–66. EDN: WWSQDX.
36. Степанов С.Ю., Петров Я.А., Сидоренко А.Ю. Геопространственный региональный анализ фотосинтетически активной биомассы по данным дистанционного зондирования Земли // Информационные технологии и системы: управление, экономика, транспорт, право. 2020. № 1. С. 186–194. EDN: OQRZFS.
37. Галченко Ю.П., Калабин Г.В., Озарян Ю.А. Методика геоинформационного мониторинга природно-технических систем на основе данных дистанционного зондирования // Известия Тульского государственного университета. Науки о Земле. 2020. № 1. С. 68–78. <https://doi.org/10.46689/2218-5194-2020-1-1-68-78>. EDN: TPYLOC.
38. Кутявина Т.И., Рутман В.В., Ашихмина Т.Я. Дистанционный мониторинг зарастания высшей водной растительностью акватории эвтрофированного водохранилища // Теоретическая и прикладная экология. 2020. № 3. С. 36–40. <https://doi.org/10.25750/1995-4301-2020-3-036-040>. EDN: XBWXKK.

References

1. Petrova A.S. Implementation of environmental projects by Rosatom state corporation. *Teoreticheskaya i prikladnaya ekologiya = Theoretical and Applied Ecology*. 2023;4:28-34. (In Russ.) <https://doi.org/10.25750/1995-4301-2023-4-028-034>. EDN: LQZLNV.
2. Ashihmina T.Ya., Skugoreva S.G., Adamovich T.A., Tovstik E.V. Assessment of the state of surface water bodies in the area of the landfill for pesticides. *Teoreticheskaya i prikladnaya ekologiya = Theoretical and Applied Ecology*. 2021;1:104-111. (In Russ.) <https://doi.org/10.25750/1995-4301-2021-1-104-111>. EDN: YEGIGM.
3. Dregulo A.M., Rodionov V.Z. HELCOM “Hot Spots”: cattle-breeding complex “Pashskiy” as the object of accumulated environmental damage. *Teoreticheskaya i prikladnaya ekologiya = Theoretical and Applied Ecology*. 2020;4:49-54. (In Russ.) <https://doi.org/10.25750/1995-4301-2020-4-049-054>. EDN: FSHOOV.
4. Kondakova L.V., Bezdenezhnyh K.A., Ashihmina T.Ya. Algological analysis of soil condition in the area of “Maradykovskij” facility after termination of its operation. *Teoreticheskaya i prikladnaya ekologiya = Theoretical and Applied Ecology*. 2019;1:23-29. (In Russ.) <https://doi.org/10.25750/1995-4301-2019-1-023-029>. EDN: ZSJTTV.
5. Kuz'min M.I., Tarasova E.N., Mamontova E.A., Mamontov A.A., Khomutova M.Yu. The impact of Baikal Pulp and Paper Mill (BPPM) wastewater and atmospheric emissions on Lake Baikal. *Uchenye zapiski Rossijskogo gosudarstvennogo gidrometeorologicheskogo universiteta*. 2013;28:51-57. (In Russ.) EDN: QJINMV.
6. Nikanorov A.M., Reznikov S.A., Matveev A.A., Arakelyan V.S. Monitoring of polycyclic aromatic hydrocarbons in the Lake Baikal basin in the areas of intensive anthropogenic impact. *Russian Meteorology and Hydrology*. 2012;37(7):477-484. <https://doi.org/10.3103/S1068373912070072>. EDN: RFZUXT.



7. Rush E.A. Mercury pollution of the Angara within the area of operation of the chemical enterprise. *Vodosnabzhenie i sanitarnaya tekhnika = Water Supply and Sanitary Engineering*. 2003;11:21-24. (In Russ.). EDN: PXIEQX.
8. Yakimova N.L., Sosodova L.M. Retrospective analysis of mercury contamination of production environment in the shops of joint-stock "Ussolyechimprom" and "Sayanskchimplast". *Byulleten' Vostochno-Sibirskogo nauchnogo tsentra Sibirskogo otdeleniya Rossiiskoi akademii meditsinskikh nauk*. 2009;5-6:71-74. (In Russ.). EDN: LLWIQL.
9. Kachor O.L., Parshin A.V., Trusova V.V. An integrated approach to the geocological 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: ADEBYY.
10. Kachor O.L., Parshin A.V., Trusova V.V., Kurina A.V. Determination of adverse impact of the former Vostsibelemt plant industrial site on environmental objects. In: *Tekhnologii pererabotki otkhodov s polucheniem novoi produktsii: materialy IV ross. nauch.-prakt. konf. s mezhdunar. uchastiem = Waste processing technologies to produce new products: materials of the 4th Russian scientific and practical conference with international participation*. 30 November 2022, Kirov. Kirov: Vyatka State University; 2022, p. 247-250. (In Russ.). EDN: ODGNBY.
11. Baenguev B.A., Belogolova G.A. Ecological and geochemical assessment of arsenic and lead compounds in technogenic soil of Svirsk. In: *Sovremennye napravleniya razvitiya geokhimii: materialy ross. konf. (s uchastiem zarubezhnykh uchenykh) = Modern directions of geochemistry development: materials of the Russian conference (with the participation of foreign scientists)*. 21–25 November 2022, Irkutsk. Irkutsk: V.B. Sochava Institute of Geography SB RAS; 2022, p. 45-48. (In Russ.). EDN: RCFLSB.
12. Shayakhmetov S.F., Merinov A.V., Merinov A.V., Zhurba O.M. Analysis of distribution and accumulation of mobile forms of heavy metals and arsenic in soils of the urbanized territory of Svirsk (Irkutsk region). *Ekologiya i promyshlennost' Rossii = Ecology and Industry of Russia*. 2023;27(9):56-60. (In Russ.) <https://doi.org/10.18412/1816-0395-2023-9-56-60>. EDN: UYGORC.
13. Baenguev B.A., Belogolova G.A. Assessment of arsenic contamination of technogenic soils in Svirsk after the liquidation of the Angarsk metallurgical plant. In: *Stroenie litosfery i geodinamika: materialy XXIX ross. molodezhn. konf. = Lithosphere structure and geodynamics: proceedings of the 29th Russian youth conference*. 11–16 May 2021, Irkutsk. Irkutsk: Institute of the Earth Crust SB RAS; 2021, p. 17-18. (In Russ.). EDN: ZXGWJJ.
14. Baenguev B.A., Belogolova G.A., Chuparina E.V., Prosekin S.N., Dolgikh P.G., Pastukhov M.V. Distribution of lead content and its compound forms in technogenic soil of the town of Svirsk (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.
15. Baenguev B.A., Belogolova G.A. Arsenic content distribution in soil on the territory of the former Angarsk metallurgical plant of Svirsk after disturbed land reclamation. In: *Bajkal'skaya molodezhnaya nauch. konf. po geologii i geofizike: materialy VI ross. molodezhn. nauch. konf. = Baikal youth scientific conference on geology and geophysics: proceedings of the 6th Russian youth scientific conference*. 23-27 August 2021, Ulan-Ude. Ulan-Ude: Buryat Scientific Centre SB RAS; 2021, p. 8-10. (In Russ.). <https://doi.org/10.31554/978-5-7925-0604-6-2021-8-10>. EDN: JTUFUJ.
16. Bogdanov A.V., Kachor O.L. Processing technology for pyrometallurgical waste dumps. *Izvestiya vysshikh uchebnykh zavedenij. Gornyy zhurnal*. 2010;5:136-144. (In Russ.). EDN: OJDFDZ.
17. Kachor O.L., Sidorov I.M., Chaika N.V., Shatrova A.S. Snow cover pollution monitoring in "town of Svirsk" municipal formation area. *Vestnik Irkutskogo gosudarstvennogo tekhnicheskogo universiteta = Bulletin of Irkutsk State Technical University*. 2013;10:82-86. (In Russ.). EDN: RGXSNR.
18. Bogdanov A.V., Kachor O.L., Abarinova N.G. Decontamination of arsenic-containing wastes of the mining and metallurgical industry. *Rossiiskij himicheskij zhurnal*. 2013;57(1):75-78. (In Russ.). EDN: UGDOUL.
19. Bogdanov A.V., Kachor O.L., Fedotov K.V., Chaika N.V. Remediation of arsenic production effects of mining and processing industry. *Ekologiya i promyshlennost' Rossii = Ecology and Industry of Russia*. 2014;5:31-35. (In Russ.). EDN: SCDGJB.
20. Kuz'minova O.V., Proydakova O.A., Yantchuk T.M. The heavy metal pollution assessment in the environmental components of Svirsk city (Irkutsk region). *Izvestiya Irkutskogo gosudarstvennogo universiteta. Seriya: Biologiya. Ekologiya = The Bulletin of Irkutsk State University. Series "Biology. Ecology"*. 2015;11:81-92. (In Russ.). EDN: TSXKOZ.
21. Grebenshchikova V.I., Kuz'min M.I., Doroshkov A.A. Ecological and geochemical features of urban ecosystems in the Baikal region. In: *Problemy ustojchivogo razvitiya regiona: IX shkola-seminar molodykh uchenykh Rossii, posvyashchennaya 70-letiyu akademika RAN Arnol'da Kirillovicha Tulokhonova = Problems of sustainable development of the region: 9th School-Seminar of young scientists of Russia dedicated to the 70th anniversary of Academician of the Russian Academy of Sciences Arnold Kirillovich Tulokhonov*. 03-07 July 2019, Ulan-Ude. Ulan-Ude; 2019, p. 99-101. (In Russ.).
22. Kachor O.L., Chaika N.V., Balchinova Ya.E. Reclamation of lands contaminated with arsenic and heavy metals in the MOD "City of Svirsk". In: *Obrazovanie Rossii i aktual'nye voprosy sovremennoi nauki: sb. st. Vseros. nauch.-prakt. konf. = Education of Russia and topical issues of modern science: collection of articles of the All-Russian scientific and practical conference*. 13–14 June 2018, Penza. Penza: Penza State Agrarian University; 2018, p. 145-151. (In Russ.). EDN: XZWPTV.
23. Butyrin M.V., Zamashchikov R.V., Husnidinov Sh.K. Assessing pollution degree of natural environment, agricultural plants and population health indicators in the city of Svirsk, Irkutsk region. *Vestnik IrGSKHA*. 2015;67:17-24. (In Russ.). EDN: TYCLBH.
24. Merinov A.V., Alekseenko A.N., Shayakhmetov S.F., Zhurba O.M. Assessment of the content of heavy metals and polycyclic aromatic hydrocarbons in the soil of the city of Svirsk, Irkutsk region. *Gigiena i Sanitariya = Hygiene and Sanitation*. 2022;101(9):1018-1022. (In Russ.). <https://doi.org/10.47470/0016-9900-2022-101-9-1018-1022>. EDN: DIEVTH.



25. Grebenshchikova V.I., Efimova N.V., Doroshkov A.A. Chemical composition of snow and soil in Svirsk city (Irkutsk Region, Pribaikal'e). *Environmental Earth Sciences*. 2017;76(20):712. <https://doi.org/10.1007/s12665-017-7056-0>. EDN: ZTKBBX.
26. Kuzminova O.V., Dimova L.M., Yanchuk T.M. Analysis of heavy metal pollution of environment in the town of Svirsk (Irkutsk region) by the geographic information system (GIS) method. *Voprosy estestvoznaniya*. 2014;(2):12-18. (In Russ.). EDN: SNGFDT.
27. Bogdanov A.V., Kachor O.L., Shatrova A.S., Chaika N.V. Recultivation of lands contaminated by wastes of mining and processing industry using wastes of pulp and paper industry. *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*. 2016;2:96-102. (In Russ.). <https://doi.org/10.21285/0301-108X-2016-55-2-96-102>. EDN: WAXNER.
28. Uvarova Yu.A., Baensch A.T., Verrall M., Cleverley J.S. Coupled XRF and XRD analyses for rapid and low-cost characterization of geological materials in the mineral exploration and mining industry. *Explore. Newsletter for the Association of Applied Geochemists*. 2014;162:1-14.
29. Sarala P., Koskinen H. Application of the portable X-Ray Diffraction (pXRD) analyser in surficial geological exploration. *Geologi*. 2018;70:58-68.
30. González S.G., Cuervo V.G. *Geotechnologies XRF and LIBS portable useful to characterize oil seep and oil-show drilling*. 2018, 10 p.
31. Dem'yanyuk K.V., Habueva D.A., Butakova E.S., Kachor O.L. Assessing environmental condition of the industrial site of the former Vostsibelemt plant. In: *Perspektivy razvitiya gorno-metallurgicheskoy otrasli (Igoshinskie chteniya): materialy ross. nauch.-prakt. konf. = Development prospects of the mining and metallurgical industry (Igoshinskie readings): proceedings of the Russian scientific and practical conference*. 26 November 2022, Irkutsk. Irkutsk: Irkutsk National Research Technical University; 2022, p. 71-75. (In Russ.). EDN: JLZOBQ.
32. Dubinin M. NDVI – theory and practice. *GIS-Lab*. 2002. Available from: <https://gis-lab.info/qa/ndvi.html> [Accessed 20th December 2023]. (In Russ.).
33. Rakov L.T., Prokofiev V.Yu., Zorina L.D. Impurity elements in quartz from gold deposits of the Darasun ore field (Eastern Transbaikalia, Russia): electron paramagnetic resonance data. *Geologiya rudnykh mestorozhdenij*. 2019;61(2):72-92. (In Russ.). <https://doi.org/10.31857/S0016-777061272-92>. EDN: PXUDXP.
34. Mihailova O.S., Bulaeva N.M., Mushiina E.A. Heavy metal pollution monitoring of soil cover for Svirsk town. *Monitoring. Nauka i tekhnologii*. 2014;(4):34-40. (In Russ.). EDN: PXUDXP.
35. Ul'yanceva Yu.O. The use of space images for data biomass of Crimea. *Geopolitika i ekogeodinamika regionov = Geopolitics and Ecogeodynamics of Regions*. 2015;1(4):61-66. (In Russ.). EDN: WWSQDX.
36. Stepanov S.Yu., Petrov Ya.A., Sidorenko A.Yu. Geospatial regional analysis of photosynthetically active biomass based on remote sensing data. *Informacionnye tekhnologii i sistemy: upravlenie, ekonomika, transport, pravo*. 2020;1:186-194. (In Russ.). EDN: OQRZFS.
37. Galchenko Yu.P., Kalabin G.V., Ozaryan Ju.A. Use of remote sensing data in geoinformation monitoring of natural-technical systems. *Izvestiya Tul'skogo gosudarstvennogo universiteta. Nauki o Zemle = Izvestiya Tula State University. Earth Sciences*. 2020;1:68-78. (In Russ.). <https://doi.org/10.46689/2218-5194-2020-1-1-68-78>. EDN: TPYLOC.
38. Kutyavina T.I., Rutman V.V., Ashikhmina T.Ya. Remote monitoring of overgrowth of the eutrophied reservoir water area by higher aquatic vegetation. *Teoreticheskaya i prikladnaya ekologiya = Theoretical and Applied Ecology*. 2020;3:36-40. (In Russ.). <https://doi.org/10.25750/1995-4301-2020-3-036-040>. EDN: XBXWKK.

Информация об авторах / Information about the authors



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 Geocology Department,
Siberian School of Geosciences,
Irkutsk National Research Technical University,
Irkutsk, Russia,
✉ olgakachor@geo.istu.edu
<https://orcid.org/0000-0003-1889-9934>



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>



Гантимурова Светлана Анатольевна,
младший научный сотрудник департамента геоинформатики,
институт «Сибирская школа геонаук»,
Иркутский национальный исследовательский технический университет,
г. Иркутск, Россия,
аспирант,
Институт геохимии им. А.П. Виноградова СО РАН,
г. Иркутск, Россия,
lanagant@geo.istu.edu
<https://orcid.org/0009-0005-5978-7869>
Svetlana A. Gantimurova,
Junior Researcher of the Geoinformatics Department,
Siberian School of Geosciences,
Irkutsk National Research Technical University,
Irkutsk, Russia,
Postgraduate Student,
A.P. Vinogradov Institute of Geochemistry SB RAS,
Irkutsk, Russia,
lanagant@geo.istu.edu
<https://orcid.org/0009-0005-5978-7869>



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>



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

О.Л. Качор – написание первоначального варианта текста, выполнение исследований и экспериментов, методология исследования, управление проектом.

В.В. Трусова – написание первоначального варианта текста, выполнение исследований и экспериментов.

С.А. Гантимурова – подготовка изображений, управление данными.

И.Н. Горячев – выполнение исследований и экспериментов, подготовка изображений, управление данными

З.Л. Икрамов – выполнение исследований и экспериментов, подготовка изображений.

А.В. Паршин – написание первоначального варианта текста, выполнение исследований и экспериментов, получение финансирования, методология исследования, управление проектом.

Olga L. Kachor wrote the initial version of the text of the article, performed the research and experiments, developed research methodology, provided project management.

Valentina V. Trusova wrote the initial version of the text of the article, performed the research and experiments.

Svetlana A. Gantimurova prepared images, performed data management.

Ivan N. Goryachev carried out research and experiments, prepared images, performed data management.

Ziyoviddin L. Ikramov carried out research and experiments, prepared images.

Alexander V. Parshin wrote the initial version of the text of the article, performed the research and experiments, obtained funding, developed research methodology, provided project management.



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 25.12.2023; одобрена после рецензирования 05.03.2024; принята к публикации 22.03.2024.

The article was submitted 25.12.2023; approved after reviewing 05.03.2024; accepted for publication 22.03.2024.

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

Краткое сообщение

УДК 551.1/4

EDN: CCJLMJ

DOI: 10.21285/2686-9993-2024-47-1-90-99

**Особенности концентрирования редких металлов
на месторождении кальдерного типа в миоцен-четвертичной
бор-литиеносной провинции Северной Америки, поиск аналогов****Д.А. Погребная^{a,✉}, А.Г. Вахромеев^b**^{a,b}*Институт земной коры СО РАН, г. Иркутск, Россия*^a*ООО «Энерджи Крафт», г. Москва, Россия*^b*Иркутский национальный исследовательский технический университет, г. Иркутск, Россия*

Резюме. В настоящее время повышенный интерес к добыче лития обуславливает его применение в широком спектре областей, в том числе для производства литий-ионных аккумуляторов. Наиболее распространенными типами сырьевых источников лития являются подземные рассолы, соленые озера («салары») и рудные минералы. В 2021 году было открыто первое и уникальное месторождение литиевых глин в кальдере Макдермитт (Невада, США), ресурсы которого оцениваются в 13,7 млн т карбоната лития с концентрацией лития 2231 мг/л. Уникальность данного месторождения обуславливает повышенный интерес к формированию модельных представлений о генезисе литиевых глин с целью поиска и разведки месторождений-аналогов. Цель данного исследования заключалась в представлении результатов обзора геологического строения и описания основных периодов развития кальдеры Макдермитт. Также авторами описаны потенциальные источники лития (магматические породы кислого состава и гидротермальные флюиды), пути миграции литиеносных рассолов и механизм формирования глин с повышенным содержанием лития (гекторит, иллит и смектит). Предложена обобщенная модель формирования данного типа месторождений. Особое внимание уделено роли гидротермальных флюидов как потенциальному дополнительному источнику «поставки» лития в бассейн кальдеры. Для разведки и выделения месторождений-аналогов сформированы ключевые критерии, характеризующие промышленные скопления лития этого типа. В заключение выдвинуты предположения о наличии месторождений-аналогов для месторождения Такер-Пасс в кальдере Макдермитт на территории литиевой провинции на плато Альтиплано-Пуна в одной из кальдер одноименного вулканического комплекса и на Восточной Камчатке.

Ключевые слова: литиевые глины, промышленные рассолы, салары, кальдера, литиевые месторождения, гекториты

Для цитирования: Погребная Д.А., Вахромеев А.Г. Особенности концентрирования редких металлов на месторождении кальдерного типа в миоцен-четвертичной бор-литиеносной провинции Северной Америки, поиск аналогов // Науки о Земле и недропользование. 2024. Т. 47. № 1. С. 90–99. <https://doi.org/10.21285/2686-9993-2024-47-1-90-99>. EDN: CCJLMJ.

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

Brief report

**Rare metal concentration features at a caldera type deposit
in the Miocene-Quaternary boron-lithium province
of North America. Search for analogues****Daria A. Pogrebnaia^{a,✉}, Andrey G. Vakhromeev^b**^{a,b}*Institute of the Earth Crust SB RAS, Irkutsk, Russia*^a*LLC Energy Craft, Moscow, Russia*^b*Irkutsk National Research Technical University, Irkutsk, Russia*

© Погребная Д.А., Вахромеев А.Г., 2024



Abstract. The fact that lithium has a wide range of applications in many fields including the production of lithium-ion batteries determines an increased interest in lithium mining. The most common types of lithium raw material sources are underground brines, saline lakes ("salars"), and ore minerals. In 2021, the first and unique deposit of lithium clays was discovered in the McDermitt caldera (Nevada, USA). Its resources are estimated at 13.7 million tons of lithium carbonate with the lithium concentration of 2231 mg/l. The uniqueness of this deposit raises the interest in the formation of model ideas about lithium clay genesis to search for analogous deposits and explore them. The purpose of the article is to provide an overview of the geological structure and describe the main development periods of the McDermitt caldera. The authors also characterize the potential sources of lithium (felsic igneous rocks and hydrothermal fluids), migration paths of lithium-bearing brines as well as the formation mechanism of clays with a high lithium content (hectorite, illite and smectite). A generalized formation model of this type of deposits is proposed. Particular attention is paid to the role of hydrothermal fluids as a potential additional source of lithium "supply" to the caldera basin. Key criteria characteristic of industrial accumulations of lithium of this type have been formed in order to explore and identify analogous deposits. In conclusion, the authors put forward a hypothesis about the presence of deposits that are analogous to the Thacker Pass in the McDermitt caldera in the lithium province on the Altiplano-Puna plateau in one of the calderas of the Altiplano-Puna volcanic complex, and in Eastern Kamchatka.

Keywords: lithium clays, industrial brines, salars, caldera, lithium deposits, hectorites

For citation: Pogrebnaia D.A., Vakhromeev A.G. Rare metal concentration features at a caldera type deposit in the Miocene-Quaternary boron-lithium province of North America. Search for analogues. *Nauki o Zemle i nedropol'zovanie = Earth sciences and subsoil use*. 2024;47(1):90-99. (In Russ.). <https://doi.org/10.21285/2686-9993-2024-47-1-90-99>. EDN: CCJLMJ.

Введение

План устойчивого развития предполагает ежегодное увеличение использования возобновляемой энергии. Литий является стратегически важным элементом для обеспечения движения по пути «зеленой энергетики». Широкое применение литий-ионных аккумуляторов для производства электрического транспорта предъявляет высокие требования к качеству и обеспечивает растущий спрос на данный ресурс. Следовательно, пристальное внимание к добыче лития обуславливает повышенный интерес к его поиску и разведке.

Понимание геолого-генетической модели формирования литиевых месторождений разных минерагенических типов является ключевым шагом для поиска и выделения потенциальных зон поиска. Мировые запасы лития условно подразделяют [1] на несколько основных минеральных типов: в твердом сырье это литиеносные (сподуменовые) и комплексные (литий, бериллий, ниобий, тантал, олово) пегматиты; редкометальные апогранитные метасоматиты (оловоносные циннвальдитовые грейзены, бериллиеносные олигоклаз-флогопитовые грейзены, слюдисто-флюоритовые метасоматиты) в комплексных месторождениях (бериллий, ниобий, тантал, олово, флюорит) с попутной литиевой минерализацией (лепидолит, циннвальдит, поллуцит, полилитионит, литиевый мусковит, амблигонит и др. Известно более 150 минералов); особо выделяют литиевые глины (смектит, мусковит, гекторит и др.) и гидроминеральное сырье – континентальные рассолы [1–4].

К промышленным континентальным рассолам относят рапу соляных озер (поверхностные рассолы), так называемых саларов, и рассолы глубоких горизонтов на платформах и щитах. Платформенные рассолы могут быть связаны с нефтяными месторождениями или представлены самостоятельными залежами [4, 5]. Особый интерес представляют именно рассолы, приуроченные к соляным озерам («саларам»), из-за высоких концентраций лития и более низкой себестоимости добычи в сравнении с пегматитами и рассолами на платформах и щитах.

Лидером по запасам литиевых континентальных рассолов является Южная Америка с суммарными запасами около 47 млн т лития в трех странах: Боливии, Аргентине и Чили [2, 6]. За пределами Южной Америки литий из поверхностных рассолов соляных озер добывается в Соединенных Штатах Америки, где его запасы составляют 0,3 млн т, и в Китае, где они равняются 4,6 млн т лития. Содержание оксида лития в коренных месторождениях – 1,3–3 %, в рассолах – 0,01–0,5 % [2].

В последние годы разведка месторождений поверхностных рассолов расширила границы после обнаружения больших ресурсов с высокими концентрациями лития в глинах в окрестности соляных озер. Наибольший интерес из глинистых минералов представляет гекторит, так как имеет максимальные содержания лития (0,16–0,74 %). Гекторит получил свое название по месторождению в Гекторе (Калифорния), где бассейновые отложения подвержены воздействию гидротермальных флюидов, которые циркулируют вдоль зоны разлома [7]. Крупнейшим месторождением литиевых глин



является Кингс-Вэлли (новое название – Такер-Пасс) в кальдере Макдермитт (Невада, США) с оцененными ресурсами 13,7 млн т карбоната лития с концентрацией лития 2231 мг/л. На территории Южной Америки гекторит был обнаружен только в области крупнейшего соляного озера Салар-де-Атакама с помощью спектрального картирования ASTER (англ.: Advanced Spaceborne Thermal Emission and Reflection Radiometer), других проявлений гекторитов пока не выявлено.

В работе [3] были определены пять крупнейших бор-литиеносных провинций, которые расположены на Анатолийском полуострове (B1), в центральных областях западных окраин Южной и Северной Америки, в Южном и Северном Тибете. Общей характеристикой этих провинций является то, что они представляют собой рудоносные лимнические отложения и/или концентрированные рассолы бессточных озер аридных впадин. Данные провинции находятся в регионах, геодинамически активных в кайнозое и в течение последних 25 млн лет [3].

Для выделения новых потенциальных областей, благоприятных для формирования

месторождений литиевых глин на территории бор-литиеносных миоцен-четвертичных провинций, и понимания особенностей их осадконакопления был выполнен анализ геологического строения месторождения Такер-Пасс в кальдере Макдермитт в штате Невада (США).

Материалы и методы исследования

Кальдера Макдермитт (месторождение Такер-Пасс) расположено в зоне невадийского орогена в области субдукции второго типа плиты Хуан де Фука под Северо-Американской плитой [8]. Невадийский орогенез произошел вдоль западной окраины Северной Америки в период между средней юрой и ранним меловым периодом (примерно от 155 до 145 млн лет назад). Согласно классификации Т.В. Романюк и А.В. Ткачева, он располагается в бор-литиеносной провинции B3 (рис. 1) в активной трансформационной зоне: Калифорнской сдвиговой зоне в пустыне Мохаве и линии Уолкер-Лэйн, маркирующей границу между задуговой областью и реликтом вулканической дуги мезозойского времени [3].

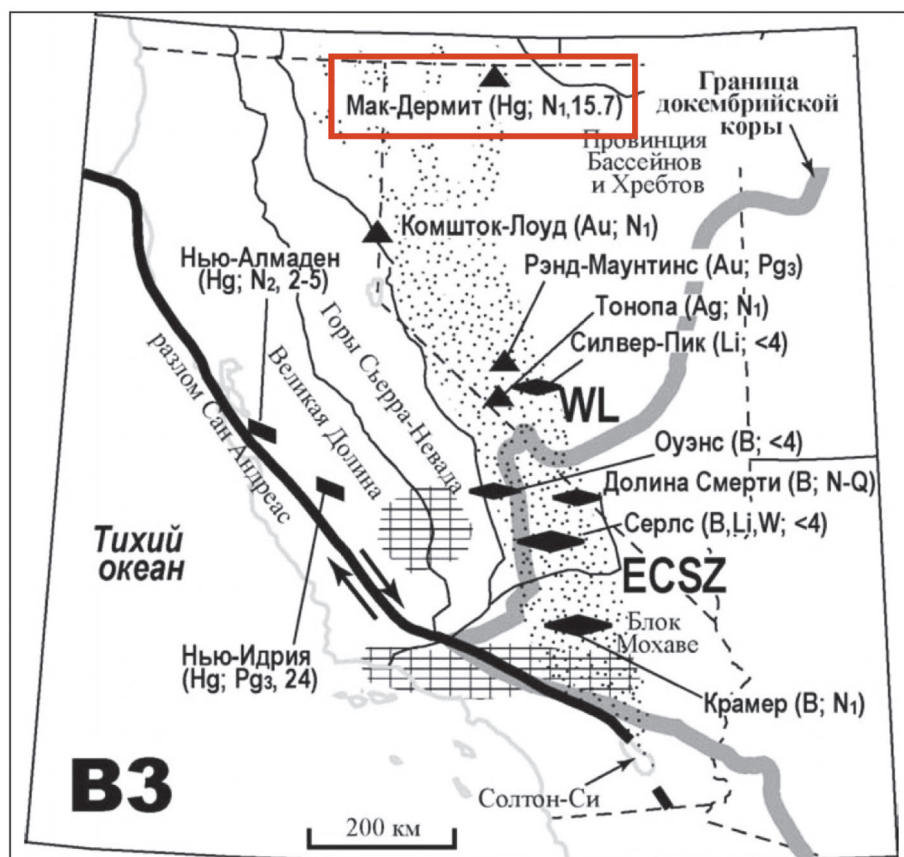


Рис. 1. Главные географические и тектонические элементы западной окраины Северной Америки. Кальдера Макдермитт выделена красным прямоугольником [3]

Fig. 1. Major geographic and tectonic elements of the western margin of North America. Red triangle indicates McDermitt Caldera [3]



Кальдера Макдермитт размером 40×30 км месторождения Такер-Пасс была сформирована под действием перемещения Йеллоустоунской горячей точки. Данная кальдера образовалась во время извержения около 1000 км³ туфа возрастом 16,39±0,02 млн лет, который имеет четкую зональность от ультращелочных риолитов с высоким содержанием диоксида кремния до метаглиноземистых трахидацитов [9], в области, подвергшейся двум небольшим эпизодам эоценового вулканизма 47 и 39 млн лет назад, а также крупному среднемиоценовому вулканизму, который привел к расширению кальдеры. Отложения, приуроченные к кальдере, разделяются на несколько областей: внутрикальдерная зона и зона закальдерного пространства. В зоне кальдеры Макдермитт есть доказанные проявления полезных ископаемых: ртути, урана, лития, золота и циркония [9, 7]. Концентрирование полезных ископаемых связано с магматической деятельностью и наличием депрессионной структуры.

Наибольший интерес с точки зрения формирования, обогащения и сохранения литиевых толщ имеют внутрикальдерные отложения (рис. 2, оранжевый цвет). Эта формация представляет собой первично туфогенные осадочные отложения, образовавшиеся в озерном бассейне кальдеры. В основном они обнажаются в центральной части кальдеры и перекрывают отложения внутрикальдерного туфа (Tmt), в том числе поздние испандиты и риолиты Макдермитт Крик.

Разрез месторождения литиевых глин Такер-Пасс в кальдере Макдермитт представлен четвертичными отложениями (Qfy). Внутрикальдерные осадочные отложения (Tis) составляют неоднородную толщу преимущественно слабо обнаженных, слабо литифицированных вулканогенно-осадочных отложений, образованную в озерных условиях внутри кальдеры. Данная пачка представлена слоистыми отложениями туфо-песчаников, алевролитов, аргиллитов, тефры с линзами конгломератов и известняков. Туфогенные отложения в основном замещены на смектит, цеолит, калиевый полевой шпат и местами окремнены до опала и халцедона. Мощность – 190 м. Tmt представлен афировым риолитом (77 % диоксида кремния) щелочного состава. Афировые риолиты (Tar) (72–75 % диоксида кремния) характеризуют периоды докальдерной активности. Мощность отложений – от 10 до 200 м [7, 9, 10].

Глинистые отложения (отложения Tis), обогащенные литием, представлены гекторитами, иллитами и смектитами, которые перекрывают четвертичными отложениями в южной части [7, 10].

Осадконакопление смектитов в палеоозере Макдермитт началось из-за взаимодействия обломков вулканического стекла с водными растворами в замкнутом бассейне кальдеры, где подстилающие туфы имели кислый и ультращелочной состав. Озерная обстановка характеризуется наличием карбонатов и кальцитовых конкреций, образованных в одно время со смектитом. В данных условиях сформировался магниевый смектит, подобный гекториту $[\text{Na}_{0,3}(\text{Mg},\text{Li})_3\text{Si}_4\text{O}_{10}(\text{OH})_2]$ [10], так как озерный рассол содержал повышенные значения Li^+ , Rb^+ , F^- и других растворенных веществ из-за выщелачивания данных элементов из ультращелочных риолитов. Палеоозеро служило водосборным бассейном для рудоносных флюидов и дальнейшего формирования глинистых отложений после множества циклов выпаривания в замкнутом бассейне.

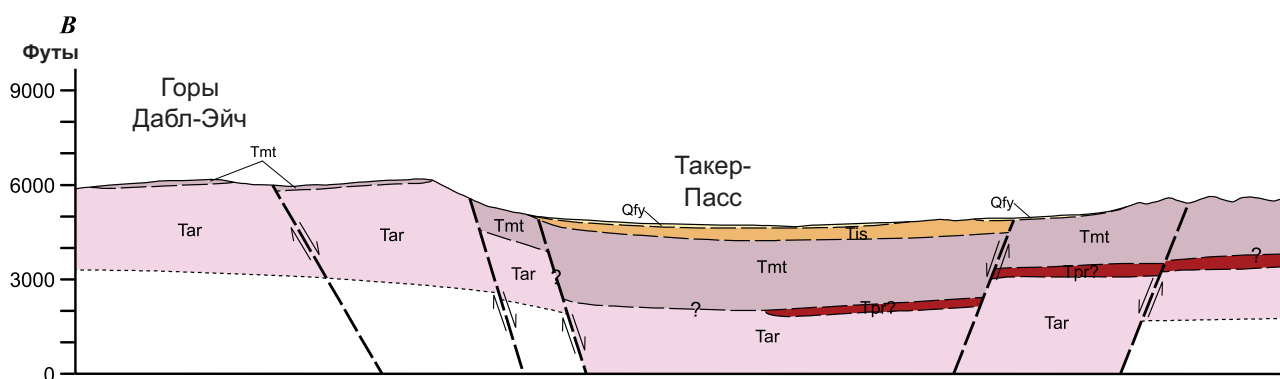


Рис. 2. Геологический разрез месторождения Такер-Пасс (по источнику [9] в переводе авторов)
Fig. 2. Geological section of the Thacker Pass deposit (according to the source [9] translated by the authors)



Литий сконцентрирован в глинистых минералах с равномерным распределением, концентрация лития росла по мере замещения первичного смектита иллитом. Точечное содержание лития в иллите составляет от 1,3 до 2,4 масс. %. По результатам анализов цельных пород из осадочных интервалов, в которых преобладает смектитовая глина по всему диапазону кальдеры, содержание лития в среднем составляет от 1000 до 4000 ppm лития¹ [6], тогда как в интервалах иллита, присутствующих только на перевале Такер, концентрации лития варьируются от 4000 до 8000 ppm с максимальным измеренным содержанием лития ~9000 ppm [11, 12].

Исходя из концептуальной модели формирования литиевых месторождений кальдерного типа, предложенной Т. Бенсоном с соавторами [6] (рис. 3), большой объем лав риолитового состава с умеренными содержаниями лития являлся основным источником для «выщелачивания и транспортировки лития» в закрытый бассейн [11]. Дополнительными источниками лития являются окогенетические пост-кальдерные события – вторичные извержения и активная деятельность гидротермальных флюидов, циркулирующих вдоль систем разломов [13]. Туфогенные отложения подвергаются изменениям и образуют литиеносные глины – гекториты, смектиты и иллиты. Большой объем продуктов извержения и их высокая пористость усиливают скорость процессов выветривания, миграции лития,

обогащения глинистых взвесей и осадконакопления в замкнутой системе. Несмотря на то, что эта модель основана на наблюдениях в кальдере Макдермитт, большинство характеристик типичны для миоценовых кальдер во внутриконтинентальных условиях [2], которые сохраняют активную деятельность гидротермальной системы, поэтому могут содержать огромные ресурсы литиевой глины, подобно месторождению Такер-Пасс. Поиск вулканогенно-осадочных месторождений литиевых глин не ограничивается Северной Америкой, так как области молодого вулканизма и крупнейшие мировые бор-литиеносные провинции известны на территории Южной Америки (например, в Чили и Аргентине), на Анатолийском полуострове, в Южном и Северном Тибете [3].

Потенциальными областями для поиска такого типа месторождений являются гидродинамически активные пояса миоцен-четвертичного возраста [3]. Именно области присутствия молодого вулканизма считаются индикаторами активной деятельности гидротермальных процессов. Кальдеры являются наиболее благоприятной обстановкой для поиска литиевых глин благодаря наличию периодов коллапса и возрождения купола, в отличие от классических бассейнов межгорных впадин. После коллапса вулкана и образования кальдеры пространство депрессии заполняется поверхностным стоком и подземными водами из геотермальных источников, образуя вулка-

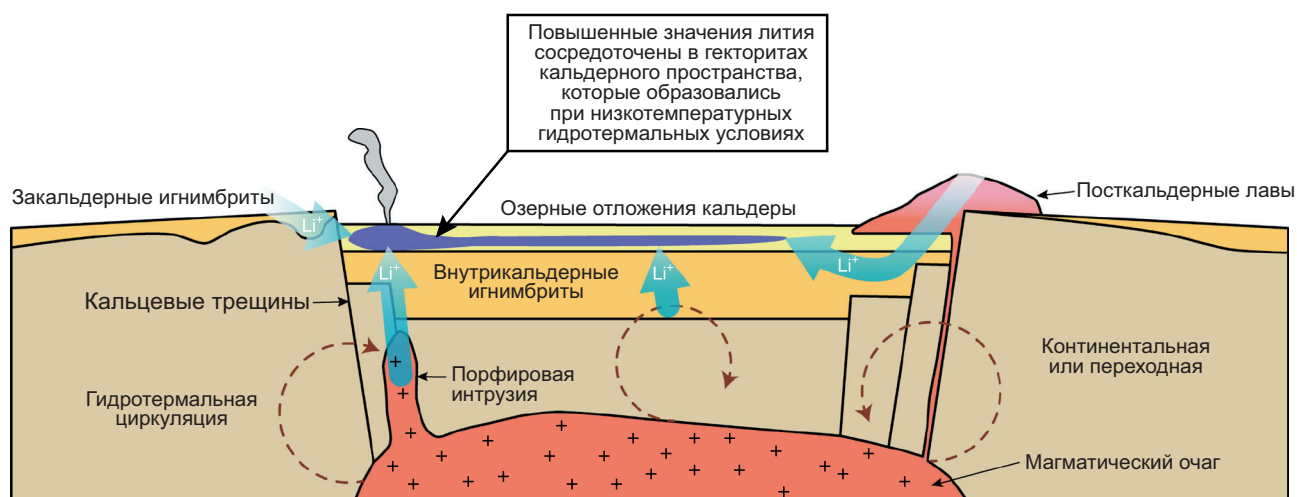


Рис. 3. Модель обогащения литием бассейна кальдеры Макдермитт (по источнику [11] в переводе авторов)

Fig. 3. Model of McDermitt caldera basin lithium enrichment (according to the source [11] translated by the authors)

¹ Голева Г.А. Гейзеры и горячие озера Кроноцкого заповедника (Камчатка): путеводитель. М: Прогресс-Академия, 1993. 59 с.



ническое озеро на поверхности изверженных пород (игнимбритов/туфов). Под действием гидротермальных процессов происходит метасоматоз. Клиноптилолит, содержащийся в игнимбритах, претерпевает изменения и превращается в глинистые отложения и далее в гекторит. Гекторитовая пачка, образованная на дне вулканического озера, является абсорбентом лития и приобретает концентрацию лития от 0,16 до 0,74 %. Действие постмагматических процессов продолжается, и из-за изменения давлений и объема магматического резервуара происходит воздымание кальедерного пространства (возрождение).

По мнению авторов, главными факторами для поиска литиевых месторождений данного типа являются:

- молодой вулканизм (кайнозойского возраста, ультращелочного состава);
- большой объем кислого вулканизма;
- активное действие гидротермальных процессов;
- наличие последовательных событий коллапса и возрождения кальдеры.

Исходя из данных характеристик был найден пример аналогичной обстановки потенциального месторождения литиевых глин на территории миоцен-четвертичной провинции B2 на плато Альтиплано-Пуна. На территории Аргентины не было сообщения о нахождении гекторита. Кальдера Лагуна де Вилама (рис. 4) расположена на территории вулканического комплекса Алтиплано-Пуна. Данный объект является потенциальным местом для поиска гекторита по нескольким причинам:

- область кальдеры сложена продуктами кислого щелочного вулканизма (дацитового состава);
- согласно топографическому профилю, можно предполагать, что область кальдеры была заполнена вулканическим озером, после произошел этап возрождения, восточная часть кальдеры претерпела воздымание и донные озерные отложения обнажились на поверхности;
- в непосредственной близости есть касситеритовое месторождение с доказанным гидротермальным генезисом;
- в минералогической базе данных имеется информация о нахождении вблизи кальдеры минералов группы мусковита (прародителя гекторита) и каолинита;
- в области кальдеры присутствует аридный климат и имеются соляные озера.



Рис. 4. Озеро в кальдере Лагуна де Вилама

Снимок Д.А. Погребной из полевого выезда, июнь 2023 г.

Fig. 4. Lake in the Laguna de Vilama caldera

D.A. Pogrebnaia's image from the field trip, June 2023

Не менее интересны объекты-аналоги в областях молодого вулканизма нашей страны. Один из таких объектов известен в вулканогенно-активной зоне Камчатки. Это Узонско-Гейзерная вулканогенно-тектоническая депрессия¹ [14], в которой выделены и изучены Узонская и Гейзерная кальдеры. Здесь расположена самая крупная гидротермальная система Камчатки. По А.В. Кирюхину [15], Йеллоустонская (США) и Узонско-Гейзерная (Камчатка, Россия) депрессии являются примерами-индикаторами перераспределения разгрузки магмы и углекислого газа. Не вдаваясь в детали описания этого крупнейшего по масштабам Камчатки объекта, кратко отметим его особенности разнотипного гидротермального минералообразования, тесно связанного с геохимией термальных вод.

Отмечено, что породы прибрежных зон термальных озер в котловинах кальдер изменены под воздействием термальных вод и газов в пестроцветные глины, изучена вертикальная минерало-геохимическая зональность и процессы рудообразования за счет процессов сернокислотного выщелачивания изверженных пород и воздействия высокотемпературных щелочных гидротерм.

По Г.А. Голевой¹, основными типами термальных вод в Узонско-Гейзерном районе являются:

- сернисто-углекислые парогидротермы фумарольного типа;
- азотно-углекислые парогидротермы гейзерного типа;
- углекислые субтермальные (до 80 °С) воды.



В аспекте переноса редких металлов и в первую очередь лития интересен второй тип глубоких гидротерм, который формируется на большом удалении от активных вулканических структур, имеет на глубине околонейтральную реакцию, а в открытых очагах разгрузки – щелочную. В солевом составе термальных вод преобладают хлориды натрия, в газовом – углекислый газ и азот. Важнейшее отличие терм этого типа – концентрирование редких щелочных металлов: лития, рубидия, цезия, молибдена, вольфрама, германия, а также марганца. Наиболее повышенные их количества обнаружены в тонкодисперсных глинистых минералах группы цеолитов, а также пористых вулканических стеклах за счет воздействия высокотемпературных гидротерм¹.

Основным гидрогеохимическим барьером, осадителем редких щелочных элементов из термальных щелочных хлоридных вод, является сорбционно-силикатный. Он образуется при резком падении растворимости и осаждении кремнекислоты при понижении температуры в очагах разгрузки этого типа гидротерм – перегретых хлоридных вод. С ней соосаждается большая часть присутствующих в термальных водах компонентов редкощелочной группы (литий, рубидий, цезий, бериллий, вольфрам, германий и др.). Группа опалов является натечной коллоидальной формой нахождения кремнекислоты и формирует слоистые постройки гейзеритов в зонах разгрузки парогидротерм. Такие отложения детально изучены также в Северо-Мутновской вулканической зоне¹ [14, 15].

Авторами были выполнены полевые выезды в июне 2023 года на плато Альтиплано-Пуна, а в сентябре 2023 года – на гидротермальные

системы и термальные поля Камчатки. Произведен отбор геологического материала (рассола, глин и вулканической породы) на территории озера Лагуна Вилама. Первичные результаты поверхностных проб рассола показывают содержания лития 48,5 мг/л и плотность воды 1,06 г/см³. Такие результаты свидетельствуют о повышенных содержаниях лития в области кальдеры. В дальнейшем планируется провести более обширные исследования по всей территории кальдеры с целью определения локализации литиевых глин. На плато Альтиплано-Пуна расположено большое количество кальдер, зона современного вулканизма является индикатором действия гидротермальных процессов. Выполнен отбор образцов риолитов, игнимбритов, опалов, вулканического стекла в Северо-Мутновской вулканической области Восточной вулканогенной зоны Камчатки.

Заключение

Новое в геологии, в процессах концентрирования редких металлов, в первую очередь лития, в толщах глин вулканотектонической депрессии Йеллоустонской гидротермальной системы, кальдеры Макдермитт – это веское основание вернуться к изучению объектов-аналогов на территории Южной Америки, Центральной и Северо-Восточной Азии. В России – древних гидротермальных систем Сибирской платформы [4, 5, 16] и молодых гидротермальных систем вулканогенно-активной зоны Камчатки¹ [15, 17]. Поиск, разведка, исследование и картирование месторождений-аналогов открывает потенциал к расширению ресурсной базы и введению в эксплуатацию нового типа редкометалльных месторождений – литиевых глин.

Список источников

1. Боярко Г.Ю., Хатьков В.Ю., Ткачева Е.В. Сырьевой потенциал лития России // Известия Томского политехнического университета. Инжиниринг георесурсов. 2022. Т. 333. № 12. С. 7–16. <https://doi.org/10.18799/24131830/2022/12/3975>. EDN: HORMRU.
2. Kesler S.E., Gruber P.W., Medina P.A., Keoleian G.A., Everson M.P., Wallington T.J. Global lithium resources: relative importance of pegmatite, brine and other deposits // Ore Geology Reviews. 2012. Vol. 48. P. 55–69. <https://doi.org/10.1016/J.OREGEOREV.2012.05.006>.
3. Романюк Т.В., Ткачев А.В. Геодинамический сценарий формирования крупнейших мировых неоген-четвертичных бор-литиевых провинций. М.: Светоч Плюс, 2010. 304 с.
4. Вахромеев А.Г., Литвинова И.В., Мисюркеева Н.В., Алексеев С.В., Погребная Д.А. К минерализации лития гидроминеральной провинции Сибирской платформы // Геодинамическая эволюция литосферы Центрально-Азиатского подвижного пояса (от океана к континенту): материалы науч. конф. (г. Иркутск, 18–21 октября 2022 г.). Иркутск, 2022. Т. 20. С. 43–45. EDN: ОЕСОКО.
5. Вахромеев А.Г., Зелинская Е.В., Литвинова И.В., Погребная Д.А. Модель вторичного концентрирования литиевых рассолов в кипящих флюидных системах магматогенно-осадочных бассейнов гидроминеральной провинции Сибирской платформы // Геотермальная вулканология, гидрогеология, геология нефти и газа (Geothermal Volcanology Workshop 2023): материалы Всерос. науч. конф. с междунар. участием (г. Петропавловск-Камчатский, 4–9 сентября 2023 г.). Петропавловск-Камчатский, 2023. С. 11–12.



6. Tabelin C.B., Dallas J.A., Casanova S., Pelech T., Bournival G., Saydam S., et al. Towards a low-carbon society: a review of lithium resource availability, challenges and innovations in mining, extraction and recycling, and future perspectives // *Minerals Engineering*. 2021. Vol. 163. P. 106743. <https://doi.org/10.1016/j.mineng.2020.106743>.
7. Castor S.B., Henry C.D. Lithium-rich claystone in the McDermitt Caldera, Nevada, USA: geologic, mineralogical, and geochemical characteristics and possible origin // *Minerals*. 2020. Vol. 10. Iss. 1. P. 68. <https://doi.org/10.3390/min10010068>.
8. DiPietro J.A. *Geology and landscape evolution. General principles applied to the United States*. Elsevier, 2018. 580 p.
9. Henry C.D., Castor S.B., Starkel W., Ellis B.S., Wolff J.A., Laravie J.A., et al. Geology and evolution of the McDermitt caldera, northern Nevada and southeastern Oregon, western USA // *Geosphere*. 2017. Vol. 13. Iss. 4. <https://doi.org/10.1130/GES01454.1>.
10. Benson T.R., Matthew A.C., Dilles J.H. Hydrothermal enrichment of lithium in intracaldera illite-bearing claystones // *Science Advances*. 2023. Vol. 9. Iss. 35. P. 1–10. <https://doi.org/10.1126/sciadv.adh8183>.
11. Benson T.R., Coble M.A., Rytuba J.J., Mahood G.A. Lithium enrichment in intracontinental rhyolite magmas leads to Li deposits in caldera basins // *Nature Communications*. 2017. Vol. 8. P. 270. <https://doi.org/10.1038/s41467-017-00234-y>.
12. Ingraffia J.T., Ressel M.W., Benson T.R. Thacker Pass lithium clay deposit, McDermitt caldera, north-central Nevada: Devitrification of McDermitt Tuff as the main lithium source // *Geological Society of Nevada Special Publication*. 2020. P. 395–410.
13. Gallup D.L. Geochemistry of geothermal fluids and well scales, and potential for mineral recovery // *Ore Geology Reviews*. 1998. Vol. 12. Iss. 4. P. 225–236. [https://doi.org/10.1016/S0169-1368\(98\)00004-3](https://doi.org/10.1016/S0169-1368(98)00004-3).
14. Топчиева О.М., Петровский В.А., Сухарев А.Е. Условия образования минеральных включений в гидротермальных метасоматитах г. Двугорбой, Южная Камчатка // *Вестник Пермского университета. Геология*. 2018. Т. 17. № 1. С. 1–10. <https://doi.org/10.17072/psu.geol.17.1.1>. EDN: LAUVYD.
15. Кирюхин А.В. Магматический фрактинг и гидротермальные системы под активными вулканами // *Геотермальная вулканология, гидрогеология, геология нефти и газа (Geothermal Volcanology Workshop 2020): материалы Всерос. науч. конф. с междунар. участием (г. Петропавловск-Камчатский, 3–8 сентября 2020 г.)*. Петропавловск-Камчатский, 2020. С. 27–31. EDN: MWRRKH.
16. Леднева В.П., Лурье М.Л. Некоторые особенности триасового магматизма Тунгусской синеклизы // *Проблемы вулканогенно-осадочного литогенеза: сб. статей / под ред. Г.С. Дзюценидзе, И.В. Соколова, И.В. Хворовой*. М.: Наука, 1974. С. 47–51.
17. Рычагов С.Н. Гигантские газо-гидротермальные системы и их роль в формировании пародоминирующих геотермальных месторождений и рудной минерализации // *Вулканология и сейсмология*. 2014. № 2. С. 3–28. <https://doi.org/10.7868/S0203030614020060>. EDN: SAIXYV.

References

1. Boyarko G.Yu., Khatkov V.Yu., Tkacheva E.V. Lithium raw potential in Russia. *Izvestiya Tomskogo politekhnicheskogo universiteta. Inzhiniring georesursov = Bulletin of the Tomsk Polytechnic University. GeoAssets Engineering*. 2022;333(12):7-16. (In Russ.). <https://doi.org/10.18799/24131830/2022/12/3975>. EDN: HORMRU.
2. Kesler S.E., Gruber P.W., Medina P.A., Keoleian G.A., Everson M.P., Wallington T.J. Global lithium re-sources: relative importance of pegmatite, brine and other deposits. *Ore Geology Reviews*. 2012;48:55-69. <https://doi.org/10.1016/J.OREGOREV.2012.05.006>.
3. Romanyuk T.V., Tkachev A.V. *Geodynamic formation scenario of the world's largest Neogene-Quaternary boron-lithium provinces*. Moscow: Svetoch Plyus; 2010, 304 p. (In Russ.).
4. Vakhromeev A.G., Litvinova I.V., Misyurkeeva N.V., Alekseev S.V., Pogrebnaya D.A. On lithium minerageny of the Siberian Platform hydromineral province. In: *Geodinamicheskaya evolyutsiya litosfery Tsentral'no-Aziatskogo podvizhnogo poyasa (ot okeana k kontinentu): materialy nauch. konf. = Geodynamic evolution of the Central Asian mobile belt lithosphere (from ocean to continent): proceedings of the scientific conference*. 18–21 October 2022, Irkutsk. Irkutsk; 2022, vol. 20, p. 43-45. (In Russ.). EDN: OECOKO.
5. Vakhromeev A.G., Zelinskaya E.V., Litvinova I.V., Pogrebnaya D.A. Model of lithium-bearing brine secondary concentration in the boiling fluid systems of magmatic-sedimentary basins of the Siberian platform hydromineral province. In: *Geotermal'naya vulkanologiya, gidrogeologiya, geologiya nefiti i gaza (Geothermal Volcanology Workshop 2023): materialy Vseros. nauch. konf. s mezhdunar. uchastiem = Geothermal Volcanology, Hydrogeology, Oil & Gas Geology (Geothermal Volcanology Workshop 2023): proceedings of the All-Russian scientific conference with the international participation*. 4–9 September 2023, Petropavlovsk-Kamchatsky. Petropavlovsk-Kamchatsky; 2023, p. 11-12. (In Russ.).
6. Tabelin C.B., Dallas J.A., Casanova S., Pelech T., Bournival G., Saydam S., et al. Towards a low-carbon society: a review of lithium resource availability, challenges and innovations in mining, extraction and recycling, and future perspectives. *Minerals Engineering*. 2021;163:106743. <https://doi.org/10.1016/j.mineng.2020.106743>.
7. Castor S.B., Henry C.D. Lithium-rich claystone in the McDermitt Caldera, Nevada, USA: geologic, mineralogical, and geochemical characteristics and possible origin. *Minerals*. 2020;10(1):68. <https://doi.org/10.3390/min10010068>.
8. DiPietro J.A. *Geology and landscape evolution. General principles applied to the United States*. Elsevier; 2018, 580 p.
9. Henry C.D., Castor S.B., Starkel W., Ellis B.S., Wolff J.A., Laravie J.A., et al. Geology and evolution of the McDermitt caldera, northern Nevada and southeastern Oregon, western USA. *Geosphere*. 2017;13(4). <https://doi.org/10.1130/GES01454.1>.
10. Benson T.R., Matthew A.C., Dilles J.H. Hydrothermal enrichment of lithium in intracaldera illite-bearing claystones. *Science Advances*. 2023;9(35):1-10. <https://doi.org/10.1126/sciadv.adh8183>.



11. Benson T.R., Coble M.A., Rytuba J.J., Mahood G.A. Lithium enrichment in intracontinental rhyolite magmas leads to Li deposits in caldera basins. *Nature Communications*. 2017;8:270. <https://doi.org/10.1038/s41467-017-00234-y>.
12. Ingrassia J.T., Ressel M.W., Benson T.R. Thacker Pass lithium clay deposit, McDermitt caldera, north-central Nevada: devitrification of McDermitt tuff as the main lithium source. *Geological Society of Nevada Special Publication*. 2020;395-410.
13. Gallup D.L. Geochemistry of geothermal fluids and well scales, and potential for mineral recovery. *Ore Geology Reviews*. 1998;12(4):225-236. [https://doi.org/10.1016/S0169-1368\(98\)00004-3](https://doi.org/10.1016/S0169-1368(98)00004-3).
14. Topchieva O.M., Petrovsky V.A., Sukharev A.E. The conditions for the formation of mineral inclusions in hydrothermal metasomatites of the Dvugorbaya mountain, Southern Kamchatka. *Vestnik Permskogo universiteta. Geologiya = Bulletin of Perm University. Geology*. 2018;17(1):1-10. (In Russ.). <https://doi.org/10.17072/psu.geol.17.1.1>. EDN: LAUVYD.
15. Kiryukhin A.V. Magmatic fracking and hydrothermal systems beneath active volcanoes. In: *Geotermal'naya vulkanologiya, gidrogeologiya, geologiya nefti i gaza (Geothermal Volcanology Workshop 2020): materialy Vseros. nauch. konf. s mezhdunar. Uchastiem = Geothermal Volcanology, Hydrogeology, Oil&Gas Geology (Geothermal Volcanology Workshop 2020): materials of the All-Russian scientific conference with international participation*. 3–8 September 2020, Petropavlovsk-Kamchatsky. Petropavlovsk-Kamchatsky; 2020, p. 27-31. (In Russ.). EDN: MWRRKH.
16. Ledneva V.P., Lurie M.L. Some features of Triassic magmatism of the Tunguska syncline. In: Dzotsenidze G.S., Sokolov I.V., Khvorova I.V. (eds). *Problemy vulkanogenno-osadochnogo litogeneza = Problems of volcanogenic-sedimentary lithogenesis*. Moscow: Nauka; 1974, p. 47-51. (In Russ.).
17. Rychagov S.N. Giant gas-rich hydrothermal systems and their role in the generation of vapor-dominated geothermal fields and ore mineralization. *Vulkanologiya i seismologiya = Volcanology and seismology*. 2014;2:3-8. (In Russ.). <https://doi.org/10.7868/S0203030614020060>. EDN: SAIXYV.

Информация об авторах / Information about the authors



Погребная Дарья Александровна,
аспирант,
Институт земной коры СО РАН,
г. Иркутск, Россия,
руководитель международных проектов,
ООО «Энерджи Крафт»,
г. Москва, Россия,
✉ dapogrebnaia@energy-craft.com
<https://orcid.org/0009-0008-6658-8923>
Daria A. Pogrebnaia,
Postgraduate Student,
Institute of the Earth's Crust SB RAS,
Irkutsk, Russia,
Project Manager,
LLC Energy Craft,
Moscow, Russia,
✉ dapogrebnaia@energy-craft.com
<https://orcid.org/0009-0008-6658-8923>



Вахромеев Андрей Гелиевич,
доктор геолого-минералогических наук, профессор,
заведующий лабораторией геологии нефти и газа,
Институт земной коры СО РАН,
г. Иркутск, Россия,
профессор кафедры нефтегазового дела,
Институт недропользования,
Иркутский национальный исследовательский технический университет,
г. Иркутск, Россия,
andrey_igp@mail.ru
<https://orcid.org/0000-0002-0712-6568>
Andrey G. Vakhromeev,
Dr. Sci. (Geol. & Mineral.), Professor,
Head of the Oil and Gas Laboratory,
Institute of the Earth's Crust SB RAS,
Irkutsk, Russia,
Professor of the Department of Oil and Gas Engineering,
Institute of Subsoil Use,
Irkutsk National Research Technical University,
Irkutsk, Russia,
andrey_igp@mail.ru
<https://orcid.org/0000-0002-0712-6568>



Вклад авторов / Contribution of the authors

Д.А. Погребная – доработка концепции исследования, проведение экспериментов, обработка полученных данных, обсуждение результатов, написание текста статьи.

А.Г. Вахромеев – разработка концепции исследования, развитие методологии, обсуждение результатов, написание текста статьи.

Daria A. Pogrebnaia finalized the research concept, conducted the experiments, processed the data obtained, discussed the results and wrote the text of the article.

Andrey G. Vakhromeev developed the research concept, worked out the research methodology, discussed the results and wrote the text of the article.

Конфликт интересов / Conflict of interests

Авторы заявляют об отсутствии конфликта интересов.

The authors declare no conflict 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 26.01.2024; одобрена после рецензирования 16.02.2024; принята к публикации 26.02.2024.

The article was submitted 26.01.2024; approved after reviewing 16.02.2024; accepted for publication 26.02.2024.

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

Original article

EDN: AVKQNU

DOI: 10.21285/2686-9993-2024-47-1-100-128

**Petromagnetism and paleomagnetism
of kimberlite pipes of the Verkhnemunskoe deposit
(Yakutsk diamondiferous province)****Maksim S. Khoroshikh^a, Konstantin M. Konstantinov^{b,✉}, Igor S. Sharygin^c,
Dilyara M. Kuzina^d, Sergei V. Potapov^e, Diana Yu. Kokodey^f**^aJSC Gold Mining Company "Lenzoloto", Bodaibo, Russia^{b,f}Irkutsk National Research Technical University, Irkutsk, Russia^{c,e}Institute of the Earth's Crust SB RAS, Irkutsk, Russia^dKazan Federal University, Kazan, Russia

Abstract. The purpose of the studies of kimberlite pipes of the Verkhnemunskoe diamond field is to calculate the Middle Paleozoic paleomagnetic pole to clarify the trajectory of the apparent migration of the pole and reconstructions of the paleogeographic position of the Siberian platform at the time of the manifestation of active tectono-magmatic processes. The Verkhnemunskoye deposit is located within the Verkhnemunskoye kimberlite field of the Yakutsk diamondiferous province and includes five kimberlite pipes (Deimos, Zapolyarnaya, Komsomolskaya-Magnitnaya, Novinka and Poiskovaya), the age of which according to geological and isotopic data is estimated as Late Devonian-Early Carboniferous (372–347 Ma). For the first time scalar and vector physical parameters of kimberlites and captured xenoliths from different structural-material complexes of the Earth's crust, as well as the host terrigenous sedimentary rocks of the Early Paleozoic were obtained, which are necessary for the development of physical-geological models of the Verkhnemunskoe field deposits. A relatively deep level of erosional shearing of the field has been established. The primary (synchronous with the formation of the field) natural residual magnetization was preserved in the kimberlite cohesive mass. The main carrier minerals of natural remanent magnetization vectors of kimberlites are unaltered magnesioferrite and magnetite, which indicates their thermo-sufficient nature. The natural remanent magnetization vectors of captured xenoliths indicate that the influence of hypergenic processes did not strongly affect the NRM vectors of kimberlites. Firing test is positive. The paleomagnetic pole with coordinates $\Phi = 26.5^\circ\text{N}$, $\Lambda = 142.2^\circ\text{E}$, $dp/dm = 6.2/7.8^\circ$ was calculated from the obtained clusters of $N = 10$ vectors of the primary natural remanent magnetization of kimberlite pipes. On its basis, we reconstructed the paleogeographic position of the Siberian Platform, which at the time of the kimberlite intrusion was located in the middle latitudes of the northern hemisphere and was facing north with its southern edge.

Keywords: Yakutsk diamondiferous province, Verkhnemunskoe deposit, kimberlite pipes, Zapolyarnaya, Deimos, Komsomolskaya-Magnitnaya, Novinka, Poiskovaya, kimberlites, Middle Paleozoic, paleomagnetism, magnetites, magnesioferrites

For citation: Khoroshikh M.S., Konstantinov K.M., Sharygin I.S., Kuzina D.M., Potapov S.V., Kokodey D.Yu. Petromagnetism and paleomagnetism of kimberlite pipes of the Verkhnemunskoe deposit (Yakutsk diamondiferous province). *Nauki o Zemle i nedropol'zovanie = Earth sciences and subsoil use*. 2024;47(1):100-128. <https://doi.org/10.21285/2686-9993-2024-47-1-100-128>. EDN: AVKQNU.



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

Научная статья

УДК 550.838.5:551.86:551.215:552.323

Петромагнетизм и палеомагнетизм кимберлитовых трубок Верхне-Мунского месторождения (Якутская алмазоносная провинция)

М.С. Хороших^а, К.М. Константинов^{б✉}, И.С. Шарыгин^с,
Д.М. Кузина^д, С.В. Потапов^е, Д.Ю. Кокодей^ф

^аПАО «Лензолото», г. Бодайбо, Россия

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

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

^дКазанский федеральный университет, г. Казань, Россия

Резюме. Цель проведенных исследований кимберлитовых трубок Верхне-Мунского месторождения алмазов заключалась в расчете среднепалеозойского палеомагнитного полюса для уточнения траектории кажущейся миграции полюса и реконструкций палеогеографического положения Сибирской платформы на время проявления активных тектоно-магматических процессов. Верхне-Мунское месторождение расположено в пределах Верхне-Мунского кимберлитового поля Якутской алмазоносной провинции и включает пять кимберлитовых трубок («Деймос», «Заполярная», «Комсомольская-Магнитная», «Новинка» и «Поисковая»), возраст которых по геологическим и изотопным данным оценивается как поздний девон – ранний карбон (372–347 млн лет). Впервые получены скалярные и векторные физические параметры кимберлитов и захваченных ими ксенолитов из разных структурно-вещественных комплексов земной коры, а также вмещающих террегенно-осадочные породы раннего палеозоя, необходимые для разработки физико-геологических моделей месторождений Верхне-Мунского поля. По данным анизотропии магнитной восприимчивости установлен относительно глубокий уровень эрозионного среза месторождения. Согласно палеомагнитным данным, в связующей массе кимберлитов сохранилась первичная (синхронная становлению месторождения) естественная остаточная намагниченность. Основными минералами-носителями векторов естественной остаточной намагниченности кимберлитов являются неизменные магнезиоферрит и магнетит, что свидетельствует об их термоостаточной природе. Векторы естественной остаточной намагниченности захваченных ксенолитов указывают на то, что влияние гипергенных процессов не сильно отразилось на векторах естественной остаточной намагниченности кимберлитов. Тест «обжига» вмещающих пород положительный, что указывает на первичную природу характеристической естественной остаточной намагниченности кимберлитов. По полученным кластерам $N = 10$ векторов первичной естественной остаточной намагниченности кимберлитовых трубок рассчитан палеомагнитный полюс с координатами $\Phi = 26,5^\circ$ с. ш., $\Lambda = 142,2^\circ$ в. д., $dp/dm = 6,2/7,8^\circ$. Палеомагнитное датирование векторов естественной остаточной намагниченности кимберлитов Верхне-Мунского месторождения соответствует среднему палеозою. На основе рассчитанного палеомагнитного полюса реконструировано палеогеографическое положение Сибирской платформы, которая на момент внедрения кимберлитов находилась на средних широтах северного полушария и была обращена к северу своим южным краем.

Ключевые слова: Якутская алмазоносная провинция, Верхне-Мунское месторождение, кимберлитовые трубки, Заполярная, Деймос, Комсомольская-Магнитная, Новинка, Поисковая, кимберлиты, средний палеозой, палеомагнетизм, магнетиты, магнезиоферриты

Для цитирования: Хороших М.С., Константинов К.М., Шарыгин И.С., Кузина Д.М., Потапов С.В., Кокодей Д.Ю. Петромагнетизм и палеомагнетизм кимберлитовых трубок Верхне-Мунского месторождения (Якутская алмазоносная провинция) // *Науки о Земле и недропользование*. 2024. Т. 47. № 1. С. 100–128. <https://doi.org/10.21285/2686-9993-2024-47-1-100-128>. EDN: AVKQNU.

Introduction

Apparent polar wander paths (APWP) [1] are dynamic physical geological models (PhGM) of continental drift [2], characterizing the features of the development of the Earth's lithosphere, patterns of location of endogenous and exogenous mineral deposits on it, etc. On their basis, various geological problems can be solved, for example,

dating of barren geological processes, geodynamic reconstructions of blocks of the Earth's crust (terrane), orogeny (*Greek*, “óros” is a mountain and “genesis” is origin, occurrence), minerageny. There are several different APWP for the Siberian platform [3–5, etc.], which require clarification. One of such important segments of the APWP of the Siberian Platform belongs to the Middle



Paleozoic era, when active tectonic-magmatic events, determining the manifestations of kimberlite and basite magmatism, happened [6]. Diamond deposits on the Siberian platform are associated with the first tectonic-magmatic events. In this regard, the clarification of the APWP (dynamic PhGM) The Siberian platform is an urgent problem, the solution of which determines our understanding of the processes of kimberlite formation, which will contribute to the prediction of new deposits of diamonds and other minerals in Eastern Siberia. To clarify the APWP, you need to know:

1. Age of the paleomagnetic research object.
2. The average direction of the vectors of characteristic natural remanent magnetization¹ (NRM, In^{ch} is the most stable component of the NRM isolated during magnetic cleaning, goes to 0 on the Zijdeveld vector diagram) with high statistical indicators.
3. Nature In^{ch} (to date and assess the nature of the characteristic remanent magnetization, a set of additional studies is required, which includes three groups of features: geological, physical and geophysical features).

Practically all kimberlite bodies of the Yakutsk diamondiferous province (YaDP) of the Siberian platform are promising objects for achieving this goal, since they are quite well studied in geochronological terms [7]. For their dating, age-related reference points of a geological nature are used, such as the age of the erupted and overlapping sediments, xenoliths of sedimentary rocks with certain faunal remains, isotopic dating (for example, U-Pb, K-Ar, Rb-Sr methods). According to these data, modern geological ideas about the age of the YaDP kimberlites fit into a wide time range. For example, up to seven geological epochs of kimberlite formation can be allocated for the Siberian platform [8, 9]. Due to U-Pb and Sr-Nd isotopic studies of perovskite and zircon from the kimberlites of the YaDP, four stages of kimberlite volcanism/magmatism have been reliably established: Silurian-Devonian (429–1408 Ma); Devonian-Carboniferous (376–344 Ma); Triassic (231–215 Ma); Jurassic (175–147 Ma) [10, 11]. All known diamond deposits in Russia are associated with the Devonian-carbon stage [8, 12].

The purpose of petro- and palaeomagnetic studies of kimberlites of YaDP is to calculate for each site (kimberlite type, exocontact of host

rocks) virtual geomagnetic poles (VGP is the position of the geomagnetic pole determined by the elements of the geomagnetic field, for example, declination and inclination measured at some point (direct observations or natural remanent magnetization) under the assumption that the geomagnetic field is the field of the central axial dipole. Since the intrusion of a kimberlite pipe is a rather short-term process, which does not allow averaging paleosecular variations for a single object (authors' note)) and, in general, for a cluster of pipes/fields (Verkhnemunskoe diamond deposit) a paleomagnetic pole (PMP is the average virtual geomagnetic pole calculated for some geologic time interval determined by the paleomagnetic method. It is accepted that $PMP \geq 7$ VGP) smoothing palaeomagnetic anomalies [1, 3, 13]. To do this, it is necessary to solve problems using the following algorithm:

1. Selection of promising paleomagnetic research sites.
2. Selection of statistically representative collections of oriented samples from kimberlite pipes, taking into account the solution of age-related testing of NRM vectors.
3. Obtaining petrophysical parameters.
4. Conducting magneto-mineralogical analyses.
5. Study of the component chemical composition of minerals of the ferrimagnetic fraction (MFMF).
6. Paleomagnetic studies in order to isolate the In^{ch} component.
7. Analysis of information on the evidence of their primary In^0 nature (primary (synchronous) remanent magnetization In^0 is initial remanent magnetization synchronous to the initial stage of rock formation and fully or partially preserved as part of the natural remanent magnetization by the time the samples are measured).
8. Calculation of PMP and geodynamic interpretation of the obtained material.

Materials and methods

The kimberlite pipes Deimos, Zapolyarnaya, Komsomolskaya-Magnetic, Novinka and the Poiskovaya diamond deposit Verkhnemunskoye (Fig. 1), were selected as objects of paleomagnetic study, which belong to the first ("open") type of diamond mining areas [14]. The studied kimberlite

¹ Pechersky D.M., Sokolov D.D. *Paleomagnetology, petromagnetology and geology. Dictionary-reference book for neighbors in specialty*. Moscow: Schmidt Institute of Physics of the Earth of the Russian Academy of Sciences; 2010. (In Russ.) / Печерский Д.М., Соколов Д.Д. *Палеомагнитология, петромагнитология и геология. Словарь-справочник для соседей по специальности*. М.: Изд-во ИФЗ РАН, 2010.

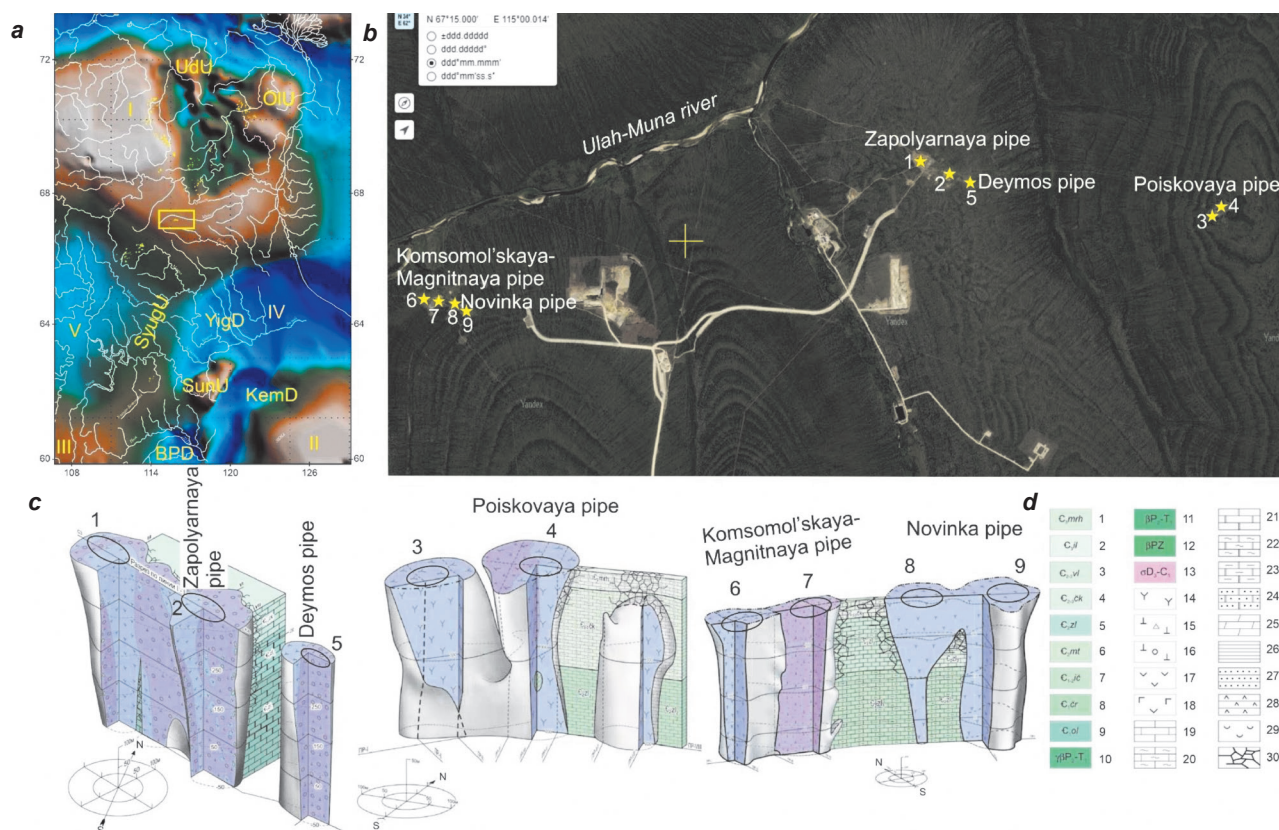


Fig. 1. Position of the area of work (rectangle) on the tectonic scheme of the eastern part of the Siberian Platform (a), the scheme of location of kimberlite bodies of the Verkhnemunskoe field (b), their volume models (c)² and symbols (d):

- 1–9 – Cambrian formations: 1 – Markhinskaya, 2 – Ilginskaya, 3 – Verkholenskaya, 4 – Chukukskaya, 5 – Zelenotsvetnaya, 6 – Metegerskaya, 7 – Icherskaya, 8 – Charskaya, 9 – Olekminskaya;
10, 11 – Permo-Triassic dolerite sills: 10 – upper level formations, 11 – lower level formations;
12 – Paleozoic dolerite sills; 13 – kimberlite bodies; 14 – coherent kimberlite; 15 – volcanoclastic kimberlite;
16 – pyroclastic kimberlite; 17 – dolerites; 18 – dolerite-basalts; 19 – limestones; 20 – clayey limestones;
21 – dolomites; 22 – clayey dolomites; 23 – silty dolomites; 24 – sandy dolomites; 25 – marlstones;
26 – mudstones; 27 – sandstones; 28 – anhydrites; 29 – rock salt;
30 – near-contact brecciation zones in sedimentary strata

Basement structures of the Siberian Platform: first order – anticlines (I – Anabarskaya, II – Aldanskaya, III – Nepsko-Botuobinskaya), synclines (IV – Vilyuiskaya, V – Tungusskaya); second order – uplifts (SunU – Suntarskaya, OIU – Olenekskaya, UdU – Udzhinskaya, SyugU – Syugdzherskaya), depressions (BPD – Baikal-Patomskaya, KemD – Kempendian, YigD – Ygyattinskaya)

Ovals with numbers are exploration trenches and their numbers

Рис. 1. Положение района работ (прямоугольник) на тектонической схеме восточной части Сибирской платформы (а), схеме расположения кимберлитовых тел Верхне-Мунского месторождения (б), их объемные модели (с)² и условные обозначения (д):

- 1–9 – свиты кембрия: 1 – мархинская, 2 – илгинская, 3 – верхоленская, 4 – чукукская, 5 – зеленоцветная, 6 – метежерская, 7 – ичерская, 8 – чарская, 9 – олекминская; 10–11 – пермо-триасовые долеритовые силлы: 10 – верхнего уровня, 11 – нижнего уровня; 12 – палеозойские долеритовые силлы; 13 – кимберлитовые тела; 14 – когерентный кимберлит; 15 – вулканокластический кимберлит; 16 – пирокластический кимберлит; 17 – долериты; 18 – долерито-базальты; 19 – известняки; 20 – глинистые известняки; 21 – доломиты; 22 – глинистые доломиты; 23 – алевроитовые доломиты; 24 – песчаные доломиты; 25 – мергели; 26 – аргиллиты; 27 – песчаники; 28 – ангидриты; 29 – каменная соль; 30 – приконтактные зоны брекчирования в осадочной толще

Структуры фундамента Сибирской платформы: первый порядок – антеклизы

(I – Анабарская, II – Алданская, III – Непско-Ботубинская), синеклизы (IV – Вилуйская, V – Тунгусская);

второй порядок – поднятия (SunU – Сунтарское, OIU – Оленекское, UdU – Уджинское, SyugU – Сюгджерское), впадины (BPD – Байкало-Патомская, KemD – Кемпендйская, YigD – Ыгыаттинская)

Овалы с цифрами – разведочные каналы и их номера

² Kostrovitsky S.I., Spezius Z.V., Yakovlev D.A., Von-der-Flaass G.S., Suvorova L.F., Bogush I.N. *Atlas of root diamond deposits of the Yakutsk kimberlite province*. Mirny: ALROSA, 2015, 480 p. (fig. 475, tab. 125). (In Russ.) / Костровицкий С.И., Специус З.В., Яковлев Д.А., Фон-Дер-Флаасс Г.С., Суворова Л.Ф., Богущ И.Н. *Атлас коренных месторождений алмазов Якутской кимберлитовой провинции*. Мирный: Изд-во АЛРОСА, 2015. 480 с. (рис. 475, табл. 125).



pipes belong to the Verkhnemunskoe field of the Mun-Tungskii diamondiferous province of the YaDP, located on the southeastern slope of the Anabar antecline (Fig. 1, a) [12].

The Verkhnemunskoye field is located on the right bank of the Ulakh-Muna River (Fig. 1, b). The host rocks are variegated carbonate, clay-carbonate rocks of the Middle and Upper

Cambrian. Igneous rocks are represented by kimberlite pipes and dykes, as well as gabbro-diabase necks and dykes [15, 16]. Trap formations (sills, dykes, etc.) of the Vilyui and Tunguska synclines have not been established within the VMP. The kimberlites of the studied tubes are characterized by xenoliths of different facies depth levels: crustal and mantle [12, 15, 16]. According

Table 1. Absolute age of kimberlite bodies of the Verkhnemunskoe diamond deposit

Таблица 1. Абсолютный возраст кимберлитовых тел Верхне-Мунского месторождения алмазов

No.	Object	Type and variety of rock	Method, [source]	Age, million years	Epoch
1	Dyke Zhyla 2	Kimberlite (?)	Rb-Sr [8]	376	D ₃ -C ₁
2	Pipe 325 years of Yakutia	Zircon from VK	U-Pb [9]	440-443	O ₃
		—	U-Pb [21]	345±12	D ₃ -C ₁
		—	U-Pb [23]	355.5±1.5	D ₃ -C ₁
		—	U-Pb [24]	354±9	D ₃ -C ₁
		—	U-Pb [10]	347.1±8.2	D ₃ -C ₁
		—	U-Pb [18]	353.2±4.8	D ₃ -C ₁
		Zircon from VK 17 crystal	Tracks U [19]	362±5	D ₃ -C ₁
		—	Lu-Hf [20]	360	D ₃ -C ₁
3	Vympel pipe	Zircon from VK 5 crystal	Tracks U [8]	367±9	D ₃ -C ₁
4	Zapolyarnaya pipe	VK	K-Ar [8]	360±10	D ₃ -C ₁
		—	K-Ar (1) [9]	360±1	D ₃ -C ₁
		—	Lu-Hf [20]	360	D ₃ -C ₁
		—	U-Pb 2 [9]	361±10	D ₃ -C ₁
		—	U-Pb 3 [9]	366.3±3.2	D ₃ -C ₁
		—	U-Pb 4 [9]	355.6±4.1	D ₃ -C ₁
5	Zimnyaya pipe	VK	K-Ar [8]	354±20	D ₃ -C ₁
		—	U-Pb [10]	353±5	D ₃ -C ₁
6	Intercosmos pipe	Zircon from VK 3 crystal	Tracks U [19]	369±11	D ₃ -C ₁
		VK	K-Ar [8]	458±12	O ₃
		—	U-Pb [10]	356.1±3.9	D ₃ -C ₁
		—	U-Pb [18]	356.3±4.1	D ₃ -C ₁
		—	Lu-Hf [20]	360	D ₃ -C ₁
7	Komsomolskaya pipe	VK	K-Ar [9]	375-382	D ₃ -C ₁
8	Magnitnaya pipe	VK	K-Ar [8]	334±4	D ₃ -C ₁
9	Novinka pipe	VK	K-Ar [8]	426±20	S ₂ -D ₁
		VK	Rb-Sr [8]	375	D ₃ -C ₁
		—	U-Pb [17]	355±11	D ₃ -C ₁
		—	Rb-Sr [8]	374±4	D ₃ -C ₁
10	Rassvet pipe	Zircon from VK	Tracks U [9]	414-451	O ₃
		—	Tracks U [19]	374±14	D ₃ -C ₁
		—	U-Pb [22]	344	D ₃ -C ₁
11	Poiskovaya pipe	—	U-Pb [17]	357±13	D ₃ -C ₁
		—	U-Pb [10]	361.8±3.2	D ₃ -C ₁
12	Komsomolskaya-Magnitnaya pipe	—	Rb-Sr [25]	402±3	S ₂ -D ₁
		—	Rb-Sr [28]	400	S ₂ -D ₁
		—	K-Ar [8]	334±4	D ₃ -C ₁
		—	K-Ar [8]	382±1	D ₃ -C ₁
		—	K-Ar [29]	375±15	D ₃ -C ₁
		—	Ar-Ar [20]	427±12	O ₃
		—	Sm-Nd [30]	360	D ₃ -C ₁



to the analysis of the available absolute dates [7–9, 17–25], it is advisable to assume that the age of kimberlite formation is the time interval from 460 to 340 million years, which coincides with the Silurian-Devonian (429–408 Ma) and Devonian-Carboniferous (376–344 Ma) the stages of kimberlite magmatism (Table 1). The second stage of formation of the Verkhnemunskoye diamond deposit is manifested most reliably.

A comprehensive study of the material composition of kimberlite pipes of the Verkhnemunskoye diamond deposit [15, 26–37] revealed common and individual features of the material composition of kimberlites of this field:

1. Kimberlites of VMP tubes are represented by three varieties:

- coherent kimberlite (CC), a full-crystalline massive kimberlite that contains up to 5 % xenoliths and/or xenocrysts, its formation occurs by direct crystallization or solidification of kimberlite magma;

- volcanoclastic kimberlite (VC), consists of fragments of volcanites (melt fragments) and xenoliths of host rocks (from 5 to 50 % of the volume). VC is formed by indirect crystallization from a melt.

- pyroclastic kimberlite (PC), contains magmaclasts, juvenile pyroclasts or pellet lapilli (rounded fragments consisting of an inner part and an outer rim, autolith kimberlites and xenoliths of host rocks up to 5–40 %.

2. The kimberlites of the studied tubes are of the magnesium-ferruginous petrochemical type by chemical composition ($\text{MgO} = 30\text{--}33 \text{ wt. } \%$, $\text{FeO (total)} = >6 \text{ wt. } \%$, $\text{TiO}_2 = >1 \text{ wt. } \%$), the most common within diamondiferous kimberlite fields.

3. In general, the kimberlites of the pipes of the Verkhnemunskoye deposit are dense rocks, slightly modified by secondary mineralization processes. Compared with kimberlites of other fields, they contain fewer fragments of sedimentary rocks and a greater number of mantle xenoliths of lherzolite and dunite-harzburgite paragenesis.

4. Kimberlites of this field are characterized by a high content of unchanged olivine, monticellite and perovskite and a low content of ilmenite.

5. There is a large number of garnets with powerful kelyphyte rims, or completely replaced by kelyphyte, which indicates the aggressive effect of kimberlite melt on mantle barophilic minerals, including diamonds.

6. The almost complete absence of xenoliths of eclogites and garnets of eclogite composition is characteristic, which indicates the specificity of

the lithospheric mantle under the kimberlite pipes of the Verkhnemunskoye deposit.

7. The high-temperature nature and elevated redox conditions at the final stages of crystallization of kimberlite magmas in the tubes of the Verkhnemunskoye deposit apparently determined the corrosion of crystals and the dissolution of some diamonds. On the other hand, the relatively low diamond content of kimberlites in this field is probably due to the specific composition of the lithosphere under this field with the practical absence of an eclogite substrate and the dominant ultrabasic one, which, in turn, caused the absence of eclogite paragenesis diamonds in the diamond populations of these tubes.

Thus, given the favorable geological (platform position, absence of post-ore magmatic objects) and physical/petromagnetic (presence of unchanged indicator minerals of kimberlites of ferrimagnetic fraction) data, as well as reliable geochronological dating (376–344 Ma), we can hope to obtain a reliable paleomagnetic result for kimberlites of the Verkhnemunskoye diamond deposit for clarifications of the APWP of the Siberian platform for the era under consideration.

The methodology of comprehensive studies of kimberlite pipes of the Verkhnemunskoe deposit to obtain PMP included:

1. Selection of oriented samples (lumps of rocks) from exploration trenches (Fig. 1, 2) and sample preparation (making cubes with a rib of 20 mm, microsections, polished sections, powders, etc.).

2. Primary measurements of bulk density σ , magnetic susceptibility χ and NRM vectors.

3. Magneto-mineralogical analyses included the study of anisotropy of magnetic susceptibility χ (AMS), hysteresis constants (HC) and Curie points (Θ) of MFMF.

4. Study of the mineralogical composition of kimberlites.

5. Study of the component composition of NRM vectors and isolation of the characteristic component I_n^{ch} [38].

6. A system of geological, physical (petromagnetic) and geophysical (paleomagnetism) evidence of the nature of I_n^{ch} : analytical studies of MFMF, field baked contact tests, analytical studies of conglomerates and/or folds, etc. [1]. In case I_n^0 is preserved in kimberlites (of thermo-sufficient or other origin, see above), the age of the kimberlite pipe is established, in case of secondary nature I_n^m : the time of manifestation of hypergene or other processes in kimberlites.



Fig. 2. Selection of oriented samples from the Verkhnemunskoe diamond deposits

(see the georeferencing in Fig. 1):

Kimberlite pipes: a, b, h – Zapolyarnaya (trenches, respectively, 1 (CK) and 2 (VK)); c – Deimos;
d, f – Poiskovaya (trenches, respectively, 3 and 4; the boundaries of the host terrigenous-sedimentary rocks
of the Early Paleozoic PZ1 are outlined); e – Komsomolskaya-Magnitnaya (trench 7); g – Novinka (trench 9)

Photo by K.M. Konstantinov

Рис. 2. Отбор ориентированных образцов из Верхне-Мунского месторождения алмазов
(привязку см. на рис. 1):

Кимберлитовые трубки: а, б, h – «Заполярная» (канавы, соответственно, 1 (СК) и 2 (ВК));
с – «Деймос»; d, f – «Поисковая» (канавы, соответственно, 3 и 4; контурной линией выделены
границы выхода вмещающих терригенно-осадочных пород раннего палеозоя PZ1);
е – «Комсомольская-Магнитная» (канавы 7); г – «Новинка» (канавы 9)

Фото К.М. Константинова



7. Calculation of PMP.

8. Interpretation of the paleomagnetic data in the light of solving the set tasks (geochronology, geodynamics, etc.).

The oriented samples were collected according to the generally accepted methodology [1] from nine exploration trenches of the Verkhnemunskoe diamond deposits (Fig. 1, c; 2, a–g). Kimberlites (KK and VC) and deep xenoliths (DX), which are conglobreccia of 0.15–0.25 m diameter of metamorphic basement rocks, were sampled in the geographical coordinate system (GCS). At the Poiskovaya pipe (Fig. 1, c; 2, d) in the third trench, according to bedding, it was possible to select deformed host terrigenous-carbonate rocks of early Paleozoic era from the exocontact zone to do a baked contact test. To achieve this goal marking in the stratigraphic coordinate system (SCS) was used: azimuth and dip angle were measured. Two or three cubes with a 20 mm rib were sawn from each lump of rock, totaling more than 660 cubes.

The studies were carried out using modern equipment: scanning electron microscope (SEM) TESCAN MIRA 3 LMU equipped with energy dispersive spectrometers (EDS) with microanalysis system AztecLive Advanced Ultim Max 40 and nitrogen-free detector (Oxford Instruments Analytical Ltd, England), magnetic susceptibility meters α (KLY-3s and MFK1-FA, AGICO, Czech Republic), spin magnetometers for measuring NRM vectors (JR-6, AGICO, Czech Republic), demagnetizing units with alternating magnetic field (AF-Demagnetizer, Molspin LTD, UK) and temperature (MMTD80, Magnetic Measurements LTD, UK), vibration magnetometers and magnetic fraction meters (KFU, Russian Federation), etc.

The complex of conducted studies of kimberlites included:

Mineralogical studies. Using SEM-EDS, images of the investigated surface in back-scattered electrons and chemical composition of minerals in the point were obtained. Working conditions: high vacuum mode at accelerating voltage of 20 kW of distance of 15 mm.

Petrophysical studies, characterizing the gravitational and magnetic state of rocks in situ. The studies are based on the research of the bulk density σ , vectors ln , induced magnetization $li = \alpha H$ (where H is the vector of the Earth's magnetic field in the area of

work) and total magnetization $ls = li + ln$, which determine the type of anomalous magnetic field over kimberlites. In turn, the magnetization vectors (ln , li , or ls) are determined in space by three components: magnitude (ln , li , and ls , respectively), declination ($0 < D < 360^\circ$), and inclination ($-90^\circ < J < 90^\circ$)³. The ln/li ratio is characterized by the Koenigsberger ratio (Q), which is usually 0.3–0.6 for YaDP kimberlites [39–42]. The primary measurements were summarized in the database “RSEARCH” [43].

Magnetic and texture analysis, based on measurements of the anisotropy of magnetic susceptibility α (AMS) of oriented samples. According to the AMS tensors (long K_1 , middle K_2 and short K_3 axes of the ellipsoid), the parameters were calculated according to the following formulas [44]:

– specified degree of anisotropy

$$P_j = \exp \sqrt{2[(\eta_1 - \eta_m)^2 + (\eta_2 - \eta_m)^2 + (\eta_3 - \eta_m)^2]},$$

where $\eta_1 = lnK_1$; $\eta_2 = 1nK_2$; $\eta_3 = 1nK_3$; $\eta_m = (\eta_1 + \eta_2 + \eta_3)/3$;

– lineation $P_1 = L = \frac{K_1}{K_2}$;

– plane $P_3 = F = \frac{K_2}{K_3}$;

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

Flattened bodies have values $0 < T \leq 1$, while negative values $-1 \leq T < 0$ are characteristic of elongated bodies. Neutral grains, which shape resembles so-called plane deformed ellipsoids, have values $T \rightarrow 0$. The long K_1 and middle K_2 axes of the AMS ellipsoid form the plane of magnetic bedding, along which the matter motion is carried out: relatively increased velocity (more than 0.01 m/s) will be observed along the K_2 axis, and decreased velocity will be observed along the K_1 axis.

In addition, according to the kimberlite pipe model [45], the type of AMS is not constant and varies vertically (from the bottom to the top): dyke, chaotic, and sedimentary [46, 47]. Thus, the AMS data can be used to judge the level of erosional shearing of the kimberlite pipe. The AMS measurements were summarized in the “RSEARCH” database [43].

Magneto-structural analysis was performed to determine the hysteresis constants (HC) of ferrimagnetic minerals of kimberlites: the values of specific magnetic moment of saturation (Ms),

³ Logachev A.A., Zakharov V.P. *Magnetic prospecting*. Leningrad: Nedra; 1979, 351 p. (In Russ.) / Логачев А.А., Захаров В.П. *Магниторазведка: учебник для вузов*. Л.: Недра, 1979. 351 с.



coercivity (H_c) from the induced magnetization curve and determination of the values of specific magnetic moment of residual saturation (M_{rs}) and its destructive field (B_{cr}) [48, 49]. To improve the accuracy of the obtained values of hysteresis constants, corrections for the background of paramagnetic minerals were applied into the graphs.

Thermomagnetic analysis allows to determine the component chemical composition of ferrimagnetics by Curie points (Θ) on the dependency graphs $\chi = f(T)$ based on the Hopkinson effect (the Hopkinson effect is a sharp increase in the magnetic susceptibility of magnetic materials in weak magnetic fields near their Curie point, due to a sharp decrease near this temperature in the magnetic anisotropy of the material). Two heating cycles were applied to study the MFMF. The methodology of stepwise demagnetizations by temperature was based on the data of thermomagnetic analysis.

Paleomagnetic studies of the component composition of NRM vectors [1]. Laboratory experiments on demagnetization by an alternating magnetic field and temperature were performed on samples of kimberlites (CK and VK), deep xenoliths (DX), and host terrigenous carbonate rocks of the Early Paleozoic from the exocontact zone (PZ₁). The characteristic ln^{ch} components of kimberlites were taken along straight lines passing through at least three points and the center of the Zijderveld vector diagram [38]. In complicated cases, a joint analysis of single directions and remagnetization circles was used [50]. The resultant statistics included data on one sample from each lump of rock that underwent stepwise demagnetization by temperature or alternating magnetic field.

In conducting petromagnetic and paleomagnetic studies, we took into account domestic and foreign methodological developments on the graphical and analytical realization of solutions of petromagnetic and paleomagnetic problems using the computer programs Statistica-6 [51], Opal-3 [52], Enkin-96 [53], Anisoft-42 [54], and PetroStat [43] and others.

Results

1. The studied kimberlites of the Verkhnemenskoe deposit are essentially carbonate-serpentine rock with relics of unaltered olivine. The chemical composition of MFMF varies within a fairly wide range and corresponds to magnetite, magnesioferrite, titanomagnetite, ilmenite, and chromspinelide² (Fig. 3).

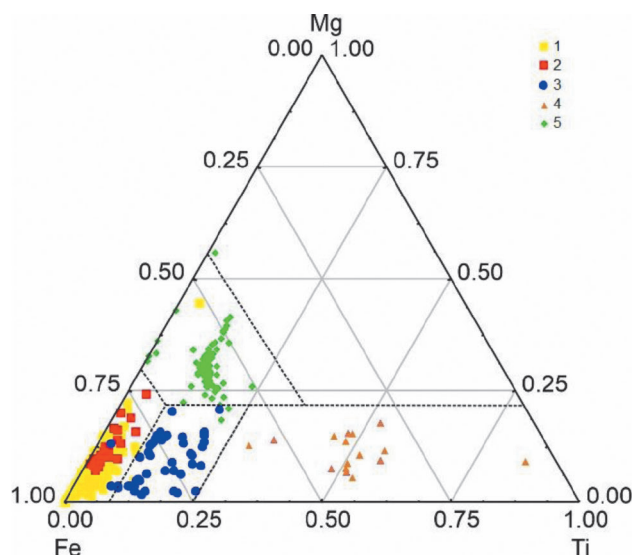


Fig. 3. Chemical composition of minerals of ferrimagnetic fractions of kimberlites from the Verkhnemenskoe deposit:

1 – magnetite; 2 – magnesioferrite; 3 – titanomagnetite; 4 – ilmenite; 5 – chromspinelide

Рис. 3. Химический состав минералов ферритагнитной фракции кимберлитов Верхне-Мунского месторождения:

1 – магнетит; 2 – магнезиоферрит; 3 – титаномагнетит; 4 – ильменит; 5 – хромшпинелид

In general, in the majority of the studied kimberlite samples, the following minerals (up to 100 microns in size) were constantly diagnosed: zonal spinelides (where the core is chromspinelide, the rim contains magnetite and/or magnesioferrite), perovskite, phlogopite, apatite, serpentine, calcite, $\pm$ dolomite, $\pm$ chlorite. However, for example, in the samples of the Komsomolskaya-Magnetic tube, in addition to the mentioned minerals, monticellite and jerfisherite (K-Cl containing iron-nickel sulfide) were noted. In addition, ilmenite was found in some samples of kimberlites of Zapolyarnaya, Deimos and Search tubes, which forms an outer rim along the perovskite of the ground mass.

It was found that the distribution of oxide mineralization in the majority of kimberlites is uniform, and the main primary ferrimagnetic minerals-carriers of magnetization (MCM) are magnesioferrite ($MgFe_2O_4$) and magnetite ($FeFe_2O_4$), which: 1) form outer rims around the zonal chrome spinelides of the ground mass; 2) form an randomly scattered fine impregnations in the mesostasis of kimberlites (Fig. 4).

Magnesioferrite is mainly distributed only in the Komsomolskaya-Magnitnaya tube, and is also found in some samples of kimberlites of the Novinka tube. Magnesioferrite has the following

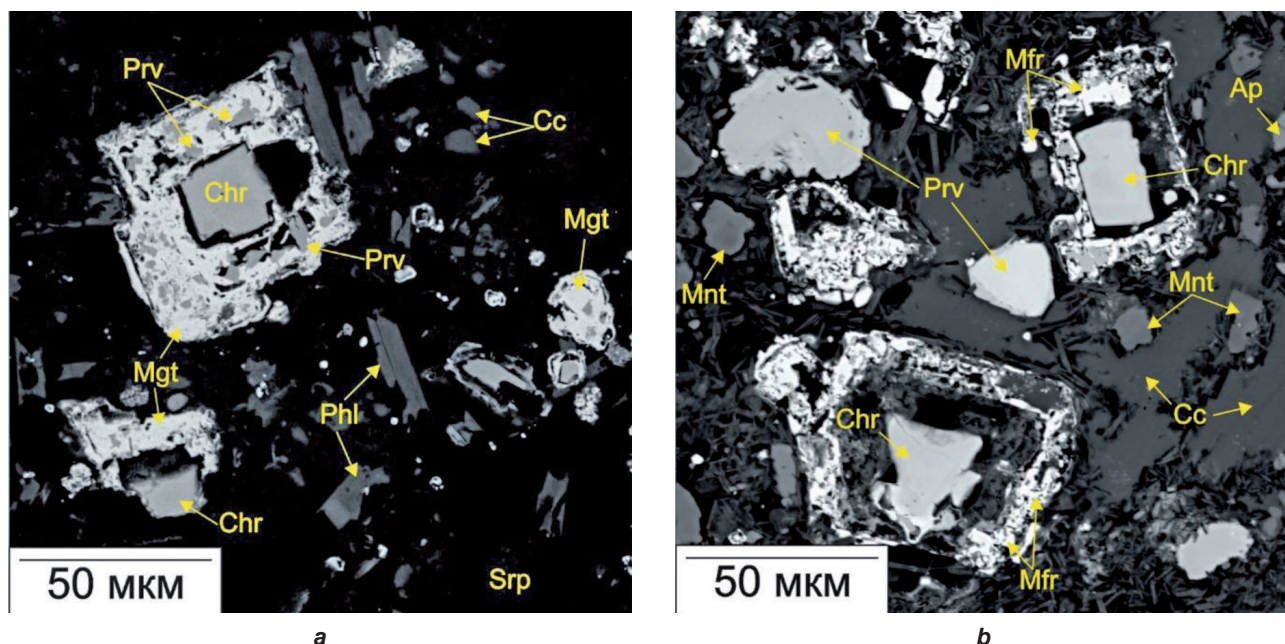


Fig. 4. Backscattered electron image:

a – Zapolyarnaya pipe: Chromspinelide (Chr) is surrounded by a magnetite rim (Mgt), with crystalline inclusions of perovskite (Prv); Phl – phlogopite, Cc – calcite; mesostasis is filled with serpentine (Srp)

b – Komsomolskaya-Magnitnaya pipe: Chromspinelide (Chr) is surrounded by an outer rim of magnesioferrite (Mfr); Prv – perovskite, Mnt – monticellite, Ap – apatite, Cc – calcite

Рис. 4. Изображение в обратно рассеянных электронах:

a – трубка «Заполярная»: хромшпинелид (Chr) окружен каймой магнетита (Mgt), с кристаллическими включениями перовскита (Prv); Phl – флогопит, Cc – кальцит; мезостазис заполнен серпентином (Srp);

b – трубка «Комсомольская-Магнитная»: хромшпинелид (Chr) окружен внешней каймой магнезиоферрита (Mfr); Prv – перовскит, Mnt – монтичеллит, Ap – апатит, Cc – кальцит

composition variations by % wt: Specific gravity FeO = 69.23–75.26; MgO = 10.5–14; Al₂O₃ = 1.66–4.16; TiO₂ = 1–4.32; MnO = 0.56–0.92; Cr₂O₃ = 0.25–1.02.

Magnetite is mainly developed in samples of kimberlites of the Zapolyarnaya, Deimos, and Poiskovaya tubes, as well as in the Novinka tube, where there is no magnesioferrite. The following variations of compositions are observed in the magnetite of the studied samples by % wt: FeO = 61.42–90.60; MgO = 0.76–10.3; Al₂O₃ = 0.3–5.61; TiO₂ = 0.27–15.9; MnO = 0.21–1.54; V₂O₃ = 0.18–0.50; Cr₂O₃ = 0.13–1.43; NiO up to 0.38. Crystalline inclusions of perovskite, about 5 µm in size, are observed in the magnetite rim forming the outer rims around the chrome spinel.

In addition to the primary MCM, magnetites were found in kimberlites, probably of xenogenic and secondary genesis.

In particular cases, individual grains larger than 150–200 µm to 500 µm were diagnosed in all studied kimberlite samples: 1) magnetite (FeO = 87.24–93.64; TiO₂ up to 1.52; Al₂O₃ up to 0.64; MgO up to 0.63; MnO up to 0.54; all by % wt.); 2) magnetite (FeO = 60.71–75.04; TiO₂ = 2.01–16.81; MgO = 3.25–7.18; V₂O₃ = 0.75–1.18; Al₂O₃ =

0.45–0.98; MnO = 0.4–1.28; Cr₂O₃ = 0.25–0.41, all by % wt.) in concretion with ilmenite. Probably, such large grains are xenocrystals that are fragments of disintegrated xenoliths.

Magnetite is constantly observed in kimberlites of the studied samples at least in three more forms of manifestation: 1) manifestations of the stringer-porphyry mineralization type, which form extended veins and flaws, as well as aggregates of radial or radial fibrous structure; 2) continuous, homogeneous clusters of magnetite, as well as clusters of skeletal structure, are observed. In addition, magnetite is always found in kimberlites of VMP, in serpentine pseudomorphoses after olivine, forming ore margins/clusters inside altered grains.

The magnetites of these manifestations have variations in compositions by % wt: FeO = 86.34–93.39; MgO = 0.78–3.25; MnO up to 1.1; and probably have a secondary genesis. Hematite and maghemite are constantly observed in association with magnetite, which form fine-grained mineralized zones, as well as crystalline inclusions of goethite in magnetite.

2. Kimberlites from the pipes of the Verkhnemunskoye deposit are characterized by complex distributions of magnetic parameters



(Fig. 5; Table 2), obeying the lognormal law typical for such geological formations [55, 56]. For example, the average geometric values of α for kimberlites varies from 25 to 100,000 $\cdot 10^{-5}$ ISU, I_n from 1 to 100 $\cdot 10^{-3}$ A/m, the Q ratio from 0.01 to 100 (!). The average geometric values of the Q ratio are noticeably increased (from 0.3 to 2.4) compared with the previously studied Middle Paleozoic kimberlites of the YDP [39–46]. Perhaps this fact indicates the presence of highly magnetic xenoliths in the cementitious matrix, the

peculiarities of kimberlite formation processes, the manifestation of physical and chemical changes in kimberlites caused by hypergenic processes, etc. The directions of the vectors I_n do not form compact clusters and are scattered throughout the sphere: the density is less than 3, and the confidence ovals $\alpha_{95} > 13^\circ$. The exception is the Novinka tube, which is characterized by predominance of kimberlites with a high Q = 1.40 index and a close clustering of vectors I_n : $D_{sr} = 328^\circ$, $J_{sr} = -61^\circ$, $k = 21.4^\circ$ and $\alpha_{95} = 3.8^\circ$.

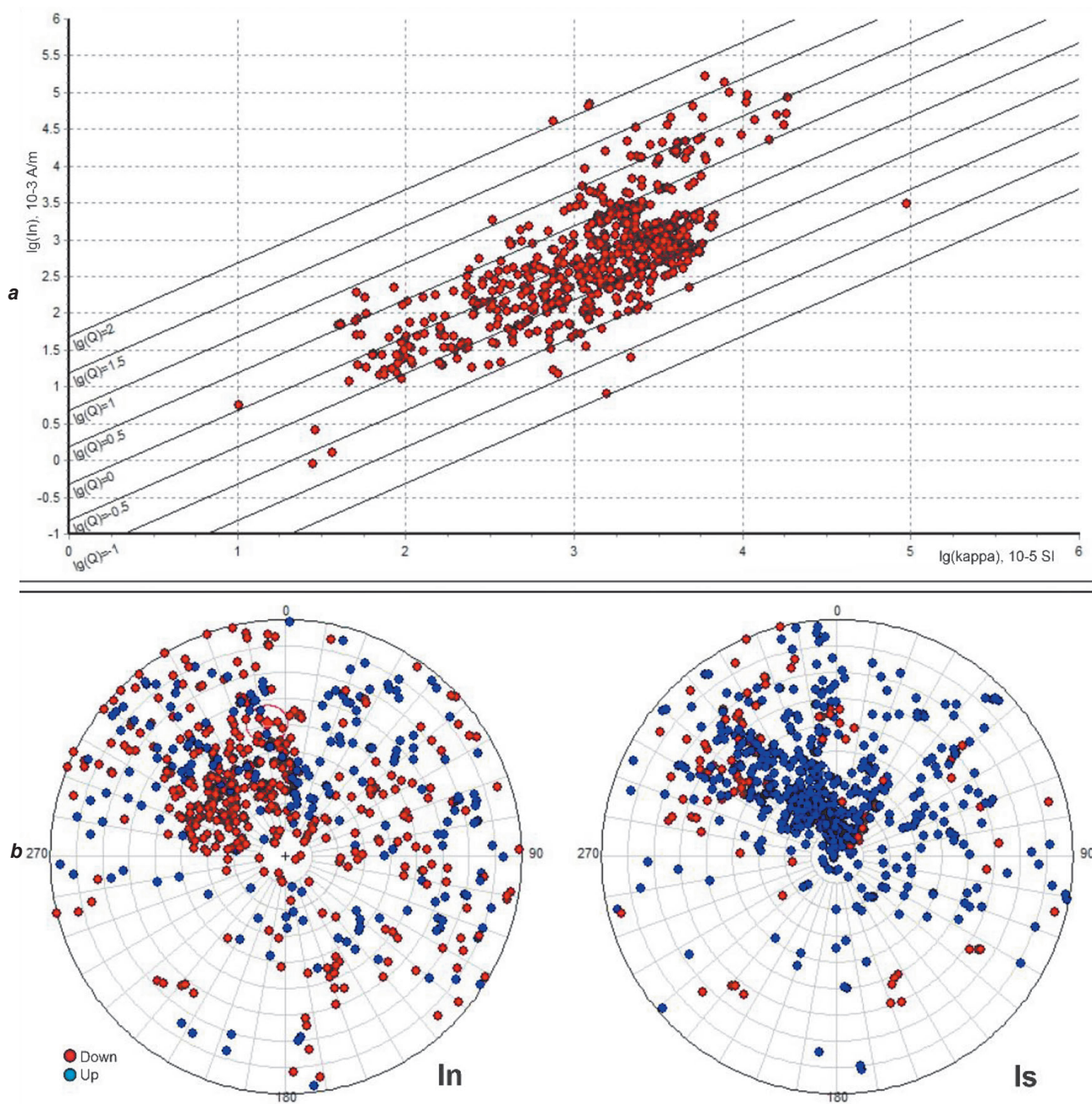


Fig. 5. Distributions of scalar (a) and vector (b) values of magnetic parameters of samples from the Verkhnemunskoe deposit
Рис. 5. Распределения скалярных (a) и векторных (b) значений магнитных параметров образцов Верхне-Мунского месторождения



Table 2. In situ magnetic parameters of kimberlite rocks of the Verkhne-Munskoe deposit
Таблица 2. Магнитные параметры горных пород Верхне-Мунского месторождения в «естественном залегании»

No.	Pipe, rock type	N	σ (*), kg/M ³	n	α (**), 10 ⁻⁵ SI	NRM				Q (**) A/m	I (**), 10 ⁻³ A/m	SM		
						I_n (**), 10 ⁻³ A/m	D , °	J , °	k/α_{95} , °			I_s (**), 10 ⁻³ A/m	D , °	J , ° k/α_{95} , °
1	Deimos, CK	9	2534 (10.5)	106	622 (1.13)	107 (1.13)	20	-56	2/13.6	0.34 (1.07)	301 (1.13)	256 (1.14)	356	67 7.4/5.4
2	Zapolyarnaya, CK	6	2480 (13.8)	196	1771 (1.06)	704 (1.11)	105	-65	1.3/32.9	0.82 (1.09)	858 (1.06)	1085 (1.09)	350	65 2.2/16.1
3	Zapolyarnaya, VK	5	2377 (31.7)	52	800 (1.16)	343 (1.20)	52	-1	1.7/24.1	0.89 (1.12)	387 (1.16)	552 (1.20)	45	63 4.2/11.1
5	Zapolyarnaya, DX	–	–	36	190 (1.27)	170 (1.20)	345	85	1.2/47.7	1.87 (1.13)	90 (1.27)	210 (1.20)	350	75 1.9/24.5
6	Poiskovaya, CK	6	2377 (15.5)	120	841 (1.16)	948 (1.24)	10	35	1.8/14.7	2.33 (1.13)	407 (1.16)	1334 (1.21)	8	59 3/9.2
7	Poiskovaya, PZ ₁ (exocontact)	–	–	11	82 (1.40)	10 (1.50)	344	4	1.8/50	0.25 (1.56)	40 (1.40)	44 (1.42)	330	65 4.6/24
8	Novinka, CK	20	2520 (11.4)	67	2498 (1.07)	1693 (1.06)	328	-61	21.4/3.8	1.40 (1.08)	1210 (1.07)	1398 (1.06)	329	-8 3.1/11.9
9	Komsomolskaya- Magnitnaya, CK	12	2592 (18.5)	48	3468 (1.05)	878 (1.07)	312	-29	3.2/14	0.52 (1.11)	1680 (1.05)	1709 (1.06)	318	55 4.9/10.4
10	Komsomolskaya- Magnitnaya, VK	7	2468 (28.2)	26	3437 (1.06)	1020 (1.37)	12	-26	1.4/45.4	0.61 (1.31)	1665 (1.06)	2250 (1.23)	25	61 2.1/26.9
–	–	65	–	662	–	–	–	–	–	–	–	–	–	–

Note. N/n – number of pieces/cubes participating in the statistics; NRM (I_n), IM (I) and SM (I_s) – natural remanent, induced and total magnetizations; D – declination, J – inclination, k – heap, α_{95} – 95 % probability confidence oval of the NRM or SM vectors; I /** – standard error of the arithmetic mean/geometric mean; CK – coherent kimberlite, VK – volcanoclastic kimberlite, DX – deep xenoliths of metamorphic basement rocks, PZ₁ – host terrigenous carbonate rocks of the Early Paleozoic.



Elevated, compared to their epigenetically sterile (unaltered by the processes of kimberlite intrusion) age analogs [62], geometric mean values $\alpha = 80 \cdot 10^{-5}$ SI, $ln = 10 \cdot 10^{-3}$ A/m and factor $Q = 0.26$ (Table 2) were determined for the host terrigenous carbonate rocks of the Early Paleozoic PZ_1 (Fig. 2, d). They may have experienced some heating from the host kimberlite magma, which is confirmed by the presence of ln directions with high negative inclination coinciding with the ln directions of the kimberlites.

The deep xenoliths (DX) of the basement rocks are characterized by geometric mean scalar parameters: $\alpha = 190 \cdot 10^{-5}$ SI, $ln = 170 \cdot 10^{-3}$ A/m and factor $Q = 1.87$. The directions of ln vectors of the studied xenoliths are distributed over the whole sphere.

The petrophysical characteristics obtained for kimberlite pipes of the Verkhnemunskoe deposit (Table 2) allow to solve a direct geophysical problem of calculating gravimagnetic anomalies on the basis of a posteriori PhGM. The ModelVisionPro-17.5 program (Encom Technology, Australia) was used for physical and geological modeling to study the nature of the gravimagnetic effect. It allows building 3D PhGM and comparing their simulated characteristics with field observation data. The program automates the process of direct modelling, which allows to verify the decision on the suitability of a particular deterministic PhGM, as well as to predict some properties of objects. Scalar and vector data on the physical properties of rocks were used to build the petrophysical model.

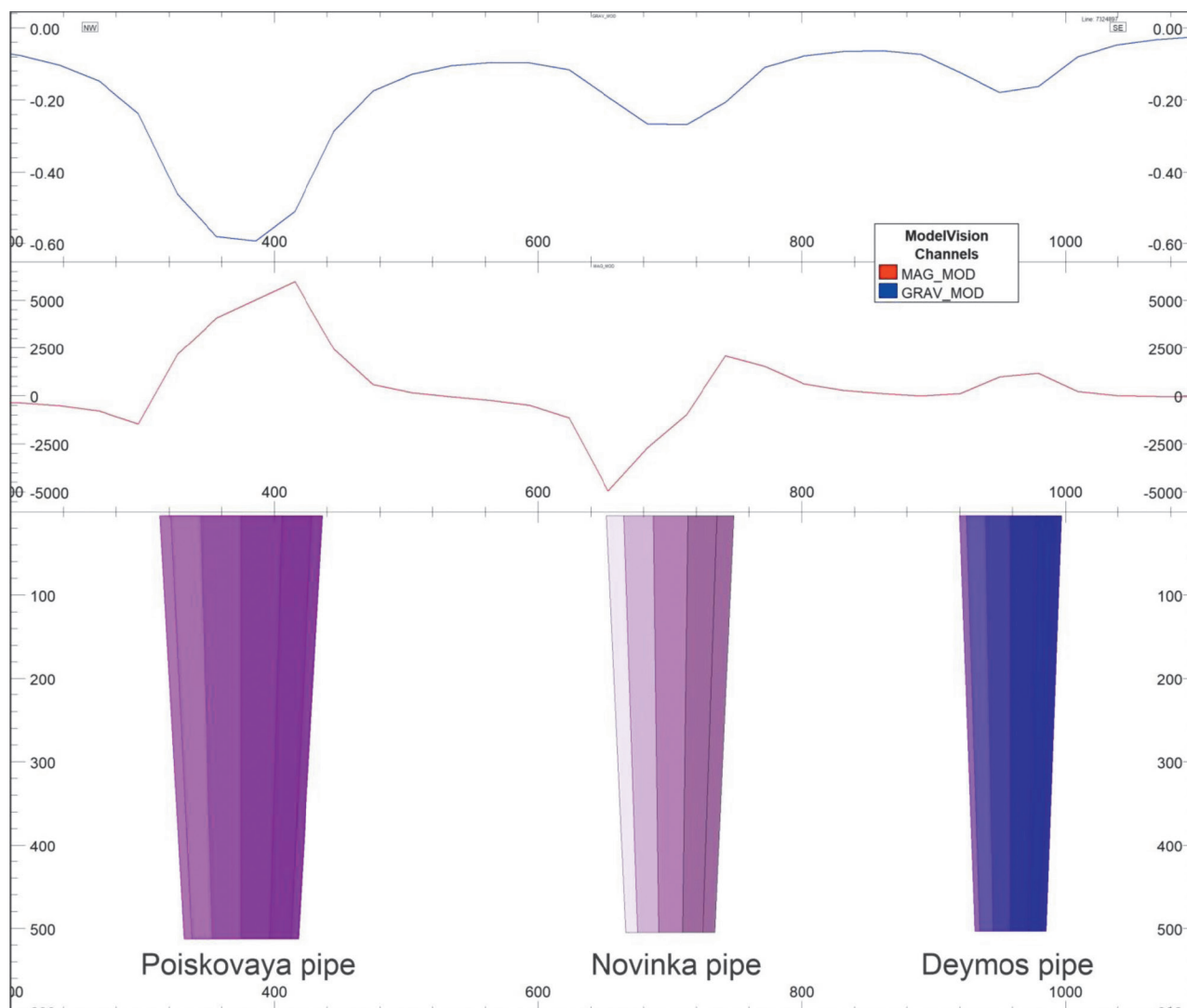


Fig. 6. Physical and geological models of kimberlite pipes of the Verkhnemunskoe deposit (direct problem)

The values of petrophysical properties from Table 2 were used to calculate the gravimagnetic effect

**Рис. 6. Физико-геологические модели кимберлитовых труб
Верхне-Мунского месторождения (прямая задача)**

Для расчета гравимагнитного эффекта использованы значения петрофизических свойств из табл. 2

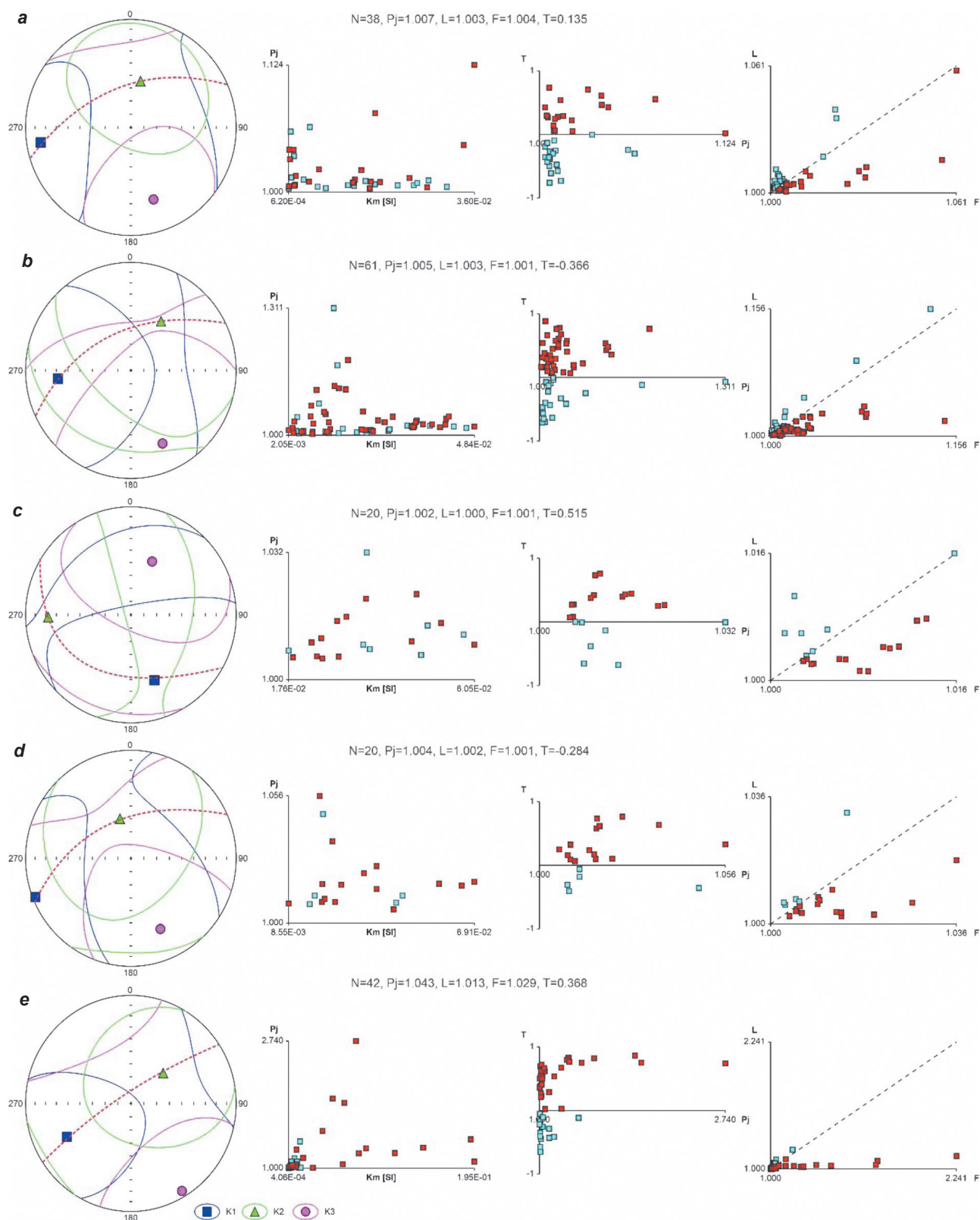


Fig. 7. Magneto-texture studies of kimberlites from the Verkhnemunskoe field pipes
Pipes: a – Deimos, b – Zapolyarnaya, c – Komsomolskaya-Magnitnaya, d – Novinka, e – Poiskovaya
Red/blue figurative dots on the graphs correspond to samples with $0 < T < 1$ / $-1 < T < 0$

See the text for other explanations

Рис. 7. Магнито-текстурные исследования кимберлитов трубок Верхне-Мунского месторождения
Трубки: а – «Деймос», б – «Заполярная», с – «Комсомольская-Магнитная», д – «Новинка», е – «Поисковая»
Красные/голубые фигуративные точки на графиках соответствуют образцам с $0 < T < 1$ / $-1 < T < 0$
Другие пояснения приведены в тексте



The host terrigenous-carbonate rocks of the Early Palaeozoic belong to practically non-magnetic formations with an average density of 2670 kg/m³. Despite the fact that the VMF belongs to the 1 diamond geotype, not all kimberlite pipes have “pipe” type anomalies (Fig. 6). For example, the Novinka pipe is characterized by an alternating magnetic anomaly, which is explained by the presence of a gently negative vector of the total magnetization of I kimberlites: $D_{cp} = 328^\circ$, $J_{cp} = -8^\circ$, $k = 3.1^\circ$ and $\alpha_{95} = 11.9^\circ$. In this regard, the maximum of the magnetic anomaly is shifted away from the epicentre of the pipe in contrast to the gravitational minimum. Therefore, it is necessary to correct the position of the drilling exploration well when completing the magnetic anomaly.

3. AMS data (Fig. 7) for kimberlites showed:

- for most of the studied Deimos, Zapolyarnaya, Komsomolskaya-Magnitnaya and Novinka pipes, the P_j values do not exceed 1 %. The values of planar F and linear L anisotropy are comparable. The exception is the Poiskovaya pipe with P_j slightly more than 4 % and $F = 1.029 \gg L = 1.013$, most likely due to the presence of strongly magnetic samples in it. On average, the “grains” resemble neutral ellipsoids (spheres) with shape parameters T close to the zero line (from -0.4 to 0.5). The correlation coefficients P_j

and α_e are insignificant: $r < 0.4$. It is possible that the significant confidence intervals of the mean directions of the AMS ellipsoid axes (K_1 , K_2 и K_3) are determined not only by different hydrodynamic conditions of formation of kimberlite bodies, but also by the magnetic texture of individual small xenoliths or their agglomerates preserved in the sample matrix.

- the noticeable magnetic stratification of kimberlites corresponds to a transitional (from top to bottom) type from the diatreme facies to the dyke facies of the pipes [42, 46, 47]. The magnetic stratification plane has a northeastern strike with a dip from 60 (Deimos, Zapolyarnaya and Novinka pipes) to 80° (Poiskovaya pipe) and does not depend on the northwestern (Fig. 1, c) strike of the studied bodies. This indicates a significant level of erosional shearing of the studied pipes (the crater facies is completely denuded, the diatreme facies is partially denuded) and their reversal in plan relative to the true strike of the supply channels (dykes). The stereograms show that the kimberlite magma movement was carried out with a relatively high speed (more than 0.01 m/s) [44]. The Komsomolskaya-Magnitnaya pipe falls out of this pattern, its AMS, to a greater extent, corresponds to the diatreme facies.

4. The scatter of hysteresis parameters of kimberlites from the studied pipes is maximum

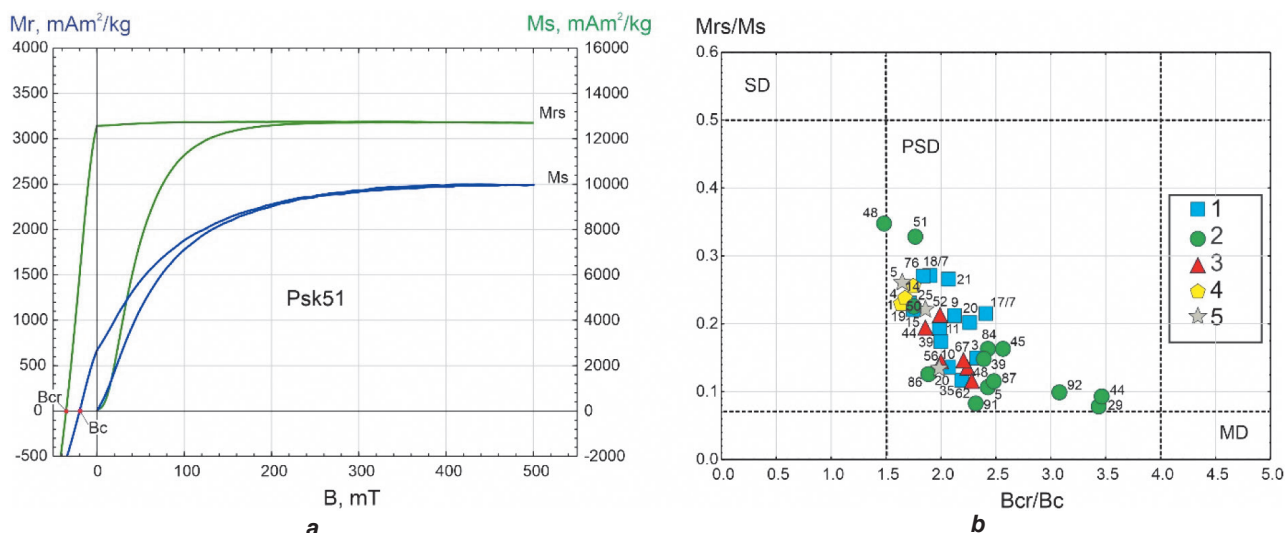


Fig. 8. Studies of the domain structure of magnetization carrier minerals of kimberlites of the Verkhnemunskoe deposit:

a – magnetic hysteresis; *b* – Day's diagram (pipes: 1 – Zapolyarnaya, 2 – Poiskovaya, 3 – Deimos, 4 – Novinka, 5 – Komsomolskaya-Magnetic)

SD, PSD and MD – distribution areas of single-, pseudo- and multidomain particles
Numbers show the numbers of studied samples

Рис. 8. Исследования доменной структуры минералов-носителей намагниченности кимберлитов Верхне-Мунского месторождения:

a – магнитный гистерезис; *b* – диаграмма Дея (трубки: 1 – «Заполярная», 2 – «Поисковая», 3 – «Деймос», 4 – «Новинка», 5 – «Комсомольская-Магнитная»)

SD, PSD и MD – области распределения одно-, псевдо- и многодоменных частиц
Цифрами показаны номера изученных образцов



for saturation magnetisation and, to a lesser extent, for coercive forces (Fig. 8, a). According to the Day criterion [48, 49], the minerals of the ferrimagnetic fraction of the kimberlite pipes of the Verkhnemunskoe deposit have a pseudo-single-domain state (Fig. 8, b), which may be a favourable condition for setting paleomagnetic studies to establish the NRM vectors of primary nature in kimberlites (pseudo-single-domain grains are magnetic grains occupying an intermediate state in the domain structure between single-domain and multi-domain grains, i.e. grains consisting of a small number of domains. Such magnetic grains behave similarly to single-domain grains in many magnetic properties, especially in magnetic stiffness. The remanent magnetization of the ensemble of pseudo-single-domain grains, like single-domain grains, has high magnetic and paleomagnetic stability).

5. The analysis of TMA curves of magnetic susceptibility showed that the ferrimagnetic fraction of the studied kimberlite pipes (Fig. 9) agrees with the conclusions of the conducted analytical studies (Figs. 3, 4). The spectrum of Curie points of the studied kimberlites of the first heating lies in the range of 400–560 °C, which correlates with the above-mentioned MFMF and some admixture of isomorphic minerals. The similarity of a number of thermomagnetograms

to the heating-cooling processes relates to the thermo-sufficient nature of the kimberlite magnetization [58]. According to the magneto-mineralogical features of MFMF, the studied kimberlite pipes of VMP have a single magmatic source (chamber), which is characteristic of a kimberlite cluster. At the same time, by this feature, they differ markedly from the previously studied pipes of other kimberlite fields of YaDP [39–46, 58, 59].

6. Paleomagnetic studies have shown that up to temperature of 200 °C or by an alternating magnetic field of up to 10 mT, the viscous component of the NRM In^v vector (viscous remnant magnetization In^v – part of magnetization formed under isothermal action of a constant geomagnetic field in time) of the studied kimberlites is usually removed (Fig. 10). In rare cases in the temperature range from 200 to 480 °C the existence of secondary (metachronous) In^m components is possible. The characteristic In^{ch} component of kimberlites is recorded in the temperature range from 200 °C to 600 °C and alternating magnetic fields from 10 to 100 mT. The deblocking temperatures of In^{ch} do not exceed 600 °C, which agrees well with the TMA results (Fig. 9). For each sample of In^{ch} vectors of kimberlite pipes of the Verkhnemunskoe field the average directions of In^{ch} and VGP vectors were calculated (Table 3; Fig. 11).

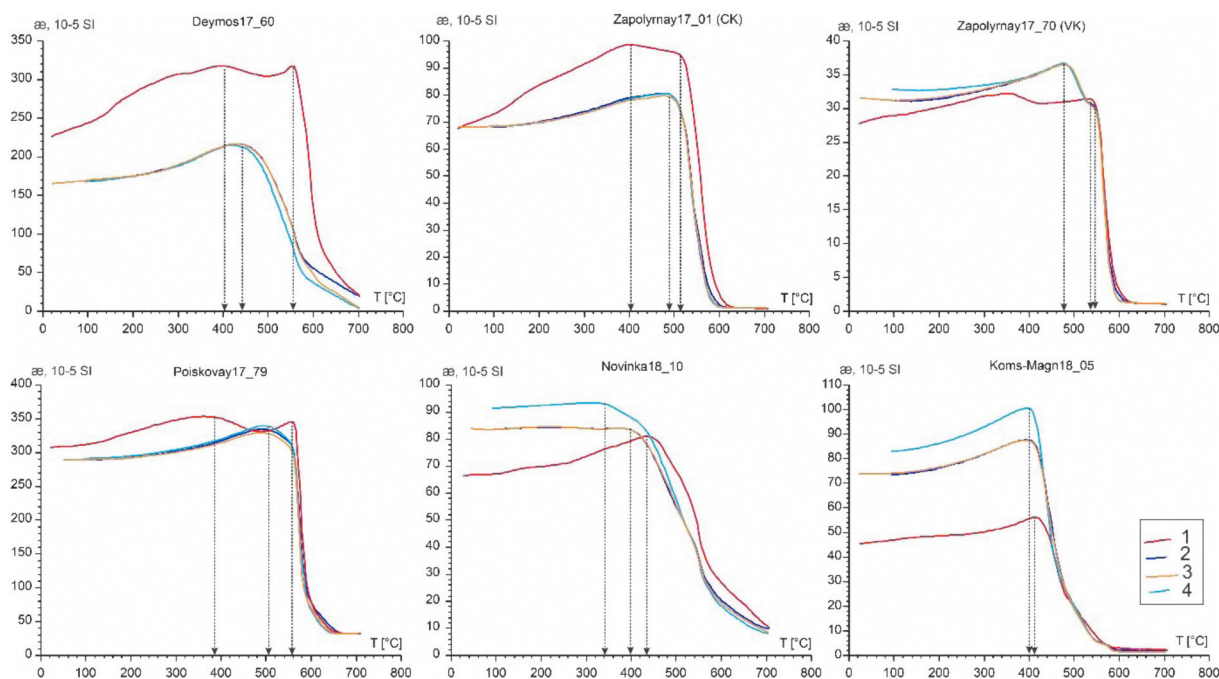


Fig. 9. Thermomagnetograms $\chi = f(T)$ of kimberlites from the Verkhnemunskoe deposit
Process: 1 – heating 1; 2 – cooling 1; 3 – heating 2; 4 – cooling 2
Рис. 9. Термомагнетизм $\chi = f(T)$ кимберлитов Верхне-Мунского месторождения
Процесс: 1 – нагрев 1; 2 – охлаждение 1; 3 – нагрев 2; 4 – охлаждение 2

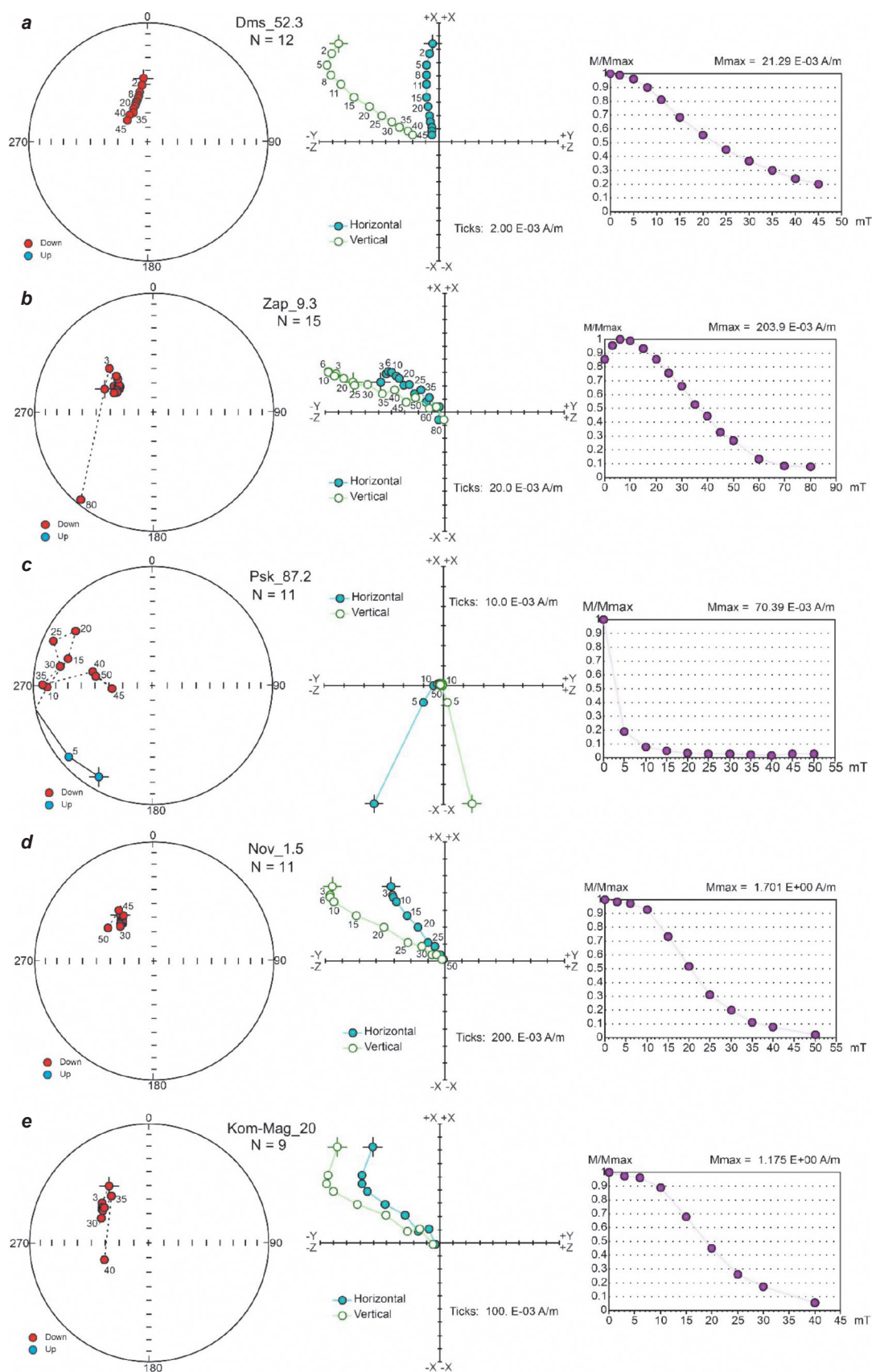


Fig. 10. Laboratory experiments on demagnetization of kimberlites from the Verkhnemunskoye field

Pipes: a – Deimos; b – Zapolyarnaya; c – Poiskovaya; d – Novinka; e – Komsomolskaya-Magnetnaya

Рис. 10. Лабораторные эксперименты по размагничиванию кимберлитов Верхне-Мунского месторождения

Трубки: а – «Деймос»; б – «Заполярная»; с – «Поисковая»; д – «Новинка»; е – «Комсомольская-Магнитная»



Table 3. Paleomagnetic directions of kimberlites of the Verkhnemunskoe deposit calculated from the characteristic component I_n^{ch}

Таблица 3. Палеомагнитные направления кимберлитов Верхне-Мунского месторождения, рассчитанные по характеристической компоненте I_n^{ch}

No	Object	N/n	$D_{cp}, ^\circ$	$J_{cp}, ^\circ$	k, unit	$\alpha_{95}, ^\circ$	$\Phi, ^\circ$	$\Lambda, ^\circ$	$dp/dm, ^\circ$	$fm, ^\circ$
1	Deimos, VK	1/12	315.6	-63.9	51.9	6.1	27.8	148.6	7.7/9.7	46
2	Zapolyarnaya, CK, NW	1/24	305.7	-64.9	28.3	5.7	31.3	155.5	7.4/9.2	47
3	Zapolyarnaya, CK, SE	1/10	320.4	-61.6	39.9	7.9	24.1	145.8	9.4/12.2	43
4	Zapolyarnaya, VK, SE	1/9	336.5	-62.6	24.8	10.7	22.7	133.1	13.1/16.7	44
5	Zapolyarnaya	3/43	316	-64.2	26.6	4.3	28.1	148.2	5.5/6.9	46
6	Poiskovaya, C	1/25	332.1	-65.8	31.7	5.2	27.3	135.6	6.9/8.5	48
7	Poiskovaya, PZ ₁ exocontact	gcs	323	-57	21.1	17.1	18.5	145.2	18.1/24.9	38
		1/5 scs	8	-72	2.4	57.2	—	—	—	—
8	Komsomolkaya-Magnitnaya, NW	1/7	331.3	-55.1	10	20.1	15.2	138.9	20.3/28.6	36
9	Komsomolkaya-Magnitnaya, SE	1/13	359.1	-73.4	6.2	18.1	36.5	115.6	29.1/32.4	59
10	Komsomolkaya-Magnitnaya	2/20	344.2	-67.3	6.7	13.6	28	126.4	18.8/22.6	50
11	Novinka, NW	1/12	310.8	-70.2	22.6	9.3	37	148.6	13.8/16	54
12	Novinka, SE	1/12	315.3	-62.4	26	8.7	26.1	149.5	10.6/13.6	44
13	Novinka	2/24	313.4	-66.3	23.8	6.2	31.2	149.1	8.4/10.2	49
14	Summary definition		324.1	-64.8	99.6	4.9	26.5	142.2	6.2/7.8	46
15	Zapolyarnaya, DX	1/13	323.9	78.3	1.2	98.4	—	—	—	—
16	Terragenic-carbonate rocks of the Upper Lena C_3vl , Morkoka C_3mrk and Oldonda C_3-O_1ol formations*		338.9	14.6	35.7	6.7	-35	136	3.5/6.9	-8
17	Aikhal, Sytykanskaya, Yubileinaya, traps of the Markha and Vilyui rivers**	11/—	—	—	—	—	11.1	149.7	8.9	31

Note. NW/SE/C – ore pillars, respectively, northwest/southeast/central; N/n – number of sites/samples participating in the statistics; gcs/scs – geographic/"stratigraphic" coordinate system; paleomagnetic pole: latitude – Φ , longitude – Λ , confidence intervals – dp/dm and paleolatitude – fm ; Paleomagnetic data on: * – [59, 60]; ** – [41]. See Table 2 for other explanations.

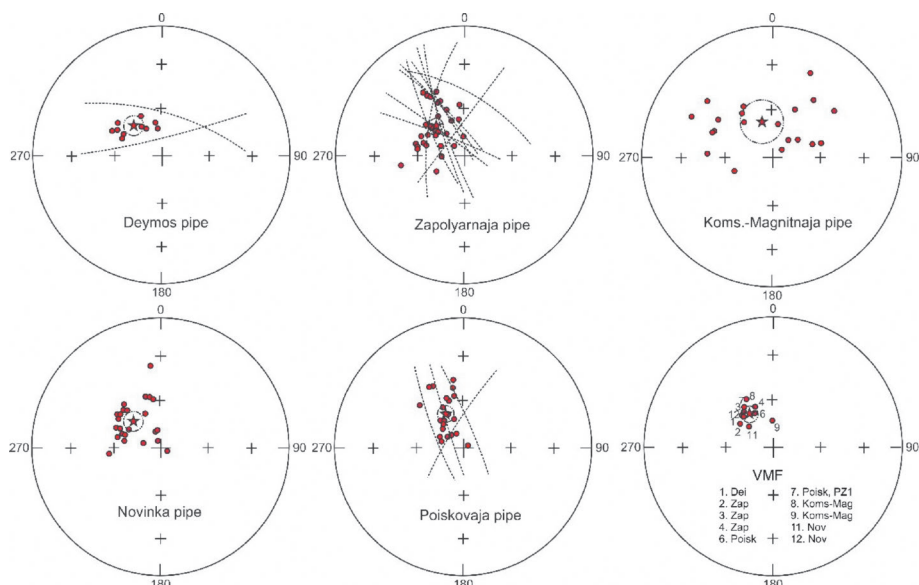


Fig. 11. Results of component paleomagnetic analysis of the natural remanent magnetisation vectors of kimberlites from the Verkhnemunskoe field:

Numbers correspond to the numbers of Table 3

VMF – Verkhnemunskoe field (summary definition)

Рис. 11. Результаты компонентного палеомагнитного анализа векторов естественной остаточной намагниченности кимберлитов Верхне-Мунского месторождения:

Цифры соответствуют номерам табл. 3

VMF – Верхне-Мунское поле (сводное определение)



The component composition of In DX vectors is also quite simple (Fig. 12, a, b). Only In^{ch} (Zap08m2ks) is present in most of the samples. In other samples the viscous component is removed

by an alternating magnetic field of up to 10 mTl (Zap01m2ks) and can account for about 70 % of the original In value (Zap06m2ks). The In^{ch} DX vectors are scattered over the whole sphere (Fig. 12, d).

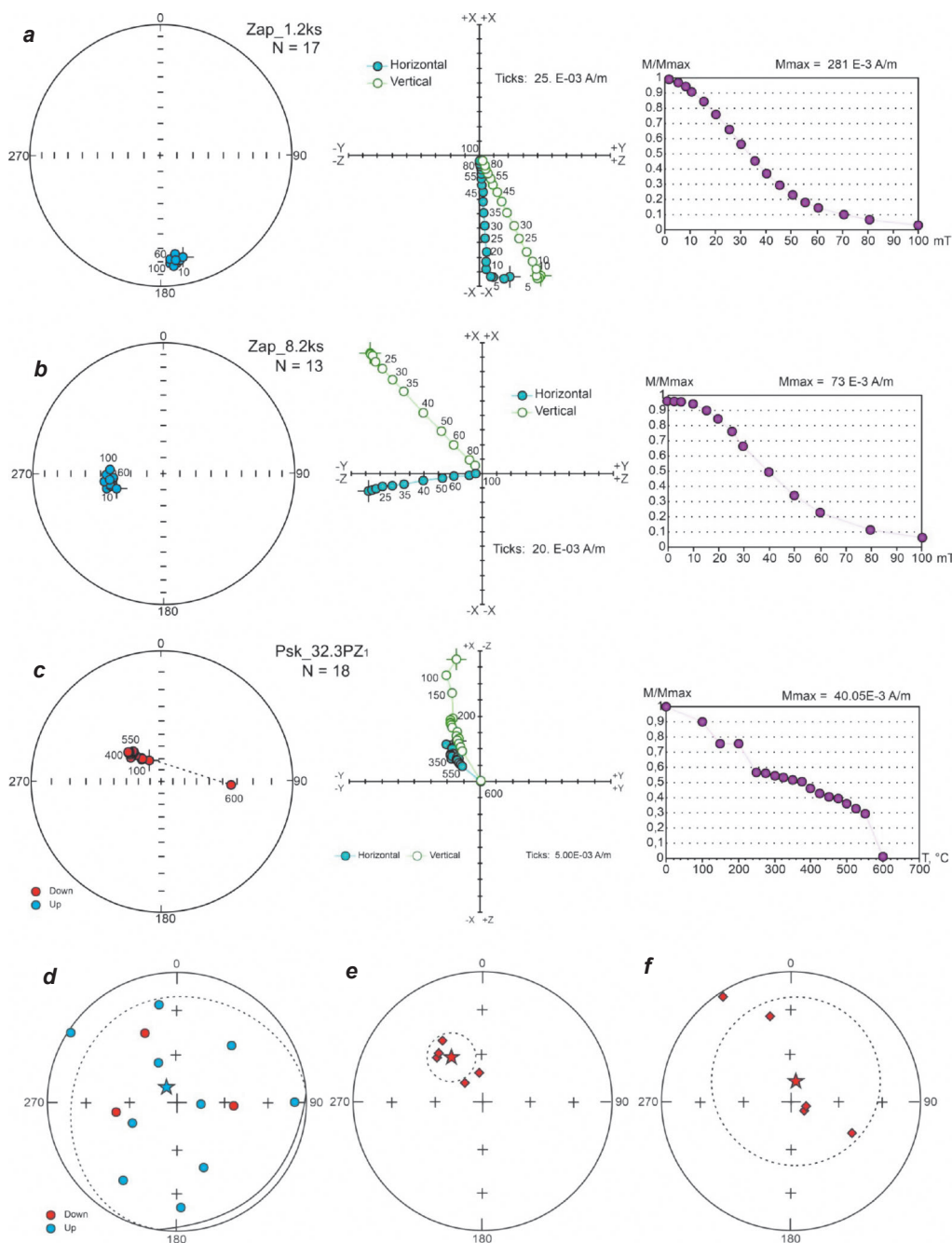


Fig. 12. Laboratory experiments of demagnetization and the results of component paleomagnetic analysis of natural remanent magnetisation vectors of xenoliths and host rocks of the Verkhnemunskoye field:
a, b – deep xenoliths of the Zapolyarnaya pipe; c – host rocks from the exocontact with kimberlites of the Poiskovaya pipe; d – vectors of characteristic natural remanent magnetisation of deep xenoliths; e/f – vectors of characteristic natural remanent magnetisation of host rocks from the exocontact in the geographic/“stratigraphic” (reduced to the horizontal plane) coordinate system

Рис. 12. Лабораторные эксперименты по размагничиванию и результаты компонентного палеомагнитного анализа векторов естественной остаточной намагниченности ксенолитов и вмещающих пород Верхне-Мунского месторождения:

a, b – глубинные ксенолиты трубки «Заполярная»; c – вмещающие породы из экзоконтакта с кимберлитами трубки «Поисковая»; d – векторы характеристической естественной остаточной намагниченности глубинных ксенолитов; e/f – векторы характеристической естественной остаточной намагниченности вмещающих пород из экзоконтакта в географической/«стратиграфической» (приведенные к горизонтальной плоскости) системе координат



The NRM vectors of the host terrigenous-carbonate rocks of the Early Paleozoic from the exocontact zone PZ₁ also turned out to be hard magnetic and retained their directions up to complete destruction by the temperature of 600 °C (Fig. 12, c). In the geographic coordinate system (gcs), their average direction (Fig. 12, e; Table 3) corresponds quite well with the characteristic NRM of the studied kimberlites (Fig. 10, 11; Table 3). Their grouping decreases markedly ($k_{gcs} = 21.1 > k_{scs} = 2.4$), the confidence oval increases with 95 % probability ($\alpha_{95gcs} = 17.1^\circ < \alpha_{95scs} = 57.2^\circ$) when they are converted to the stratigraphic coordinate system (tectonic correction for emplacement elements) (Fig. 12, f; Table 3). In addition, the average NRM vector with respect to rock layering does not agree in inclination with the previously studied age analogs of the Verkholenskaya, Morokokinskaya, and Oldondinskaya formations of the Early Paleozoic [41, 57, 59, 60]. Therefore, the nature of the vectors of the characteristic NRM of the host rocks of the exocontact is metachronous (overlying) and, most likely, formed due to their “baked contact test” by kimberlites in the process of pipe formation (contact test [1]).

Discussion

Despite the fact that kimberlite pipes of the Verkhnemunskoe deposit were affected by hypergenic and other processes, they retained the directions of the primary NRM vectors characterizing the time of intrusion (Fig. 11). The main arguments that allow to identify the characteristic NRM as syngenetic (synchronous) to the solidification of kimberlite magma are:

1. The presence of a wide range of MFMF as the main MCM, the main ones being magnetite and magnesioferrite, characterized by pseudo-single-domain structure and thermo-sufficient nature.

2. No dependence between the directions of the interpreted components of the characteristic NRM of kimberlites and the directions of the principal axes of the AMS ellipsoid (Figs. 7 and 11).

3. A significant difference in the direction of kimberlites from the known younger directions of the Siberian Platform including the “trap” direction which is present in a number of kimberlite pipes as a remagnetization direction of Permo-Triassic age [41–46].

4. Positive result of the xenolith test for the Zapolyarnaya pipe (Fig. 12, d): chaotic distribution of vectors on the sphere interpreted

as a possibility of preservation of ancient (pre-deformation) magnetization (paleomagnetic stability) which indicates the absence of complete remagnetization processes in the studied kimberlite pipes.

5. Positive contact test (Fig. 12, e, f). Presence of host rock samples from the exocontact in the geographic coordinate system of NRM directions (Fig. 12, e) similar to the characteristic NRM of kimberlites (Fig. 10).

6. Coherence with single-age (D₃-C₁) VGP of kimberlite pipes of the YaDP (Fig. 13, a; Table 3) [41–46].

Positive tests of xenoliths and baking do not contradict the mechanism of formation and development of kimberlite bodies of YDP [13, 15, 66] and indirectly confirm the above conclusions about the existence of NRM of primary nature in the samples of the studied pipes.

According to the obtained groupings of the primary NRM vectors of the studied kimberlite pipes and host rocks from the exocontact the VGP were calculated which were combined into the average paleomagnetic pole: $\Phi = 26.5^\circ\text{N}$, $\Lambda = 142.2^\circ\text{E}$, $dp/dm = 6.2/7.8$ (Table 3; Fig. 13, a). According to [13] it has a sufficiently high reliability criterion ($Q = 6$) which is determined by the following factors:

1. The correspondence to the absolute (geologic) Late Devonian-Early Carboniferous age (epochs) of YaDP kimberlites is 360 ± 10 Ma.

2. High statistical values – $N \geq 7$, $k > 10$ and $\alpha_{95} < 16$.

3. Identity of the directions of the characteristic NRM of kimberlites obtained from stepwise experiments on demagnetization by alternating magnetic field and temperature.

4. Positive field tests of xenoliths (conglomerates) and baking (contact).

5. Structural and tectonic connection of the VMF with the Siberian Platform.

6. Difference from young paleomagnetic poles of the Siberian Platform.

Comparing the calculated PMP with the APWP of the Siberian Platform [5] according to the method [58] the paleomagnetic age of the studied kimberlite pipes is estimated to be 356 ± 6 Ma (Fig. 13, a, c). This date agrees quite well with geological and isotopic data [7–9, 17–37]. Thus, the paleomagnetic data on VMF kimberlite pipes as well as other geological methods confirm the existence of the Late Devonian-Early Carboniferous epoch of kimberlite formation on the Siberian Platform. At this time the Siberian

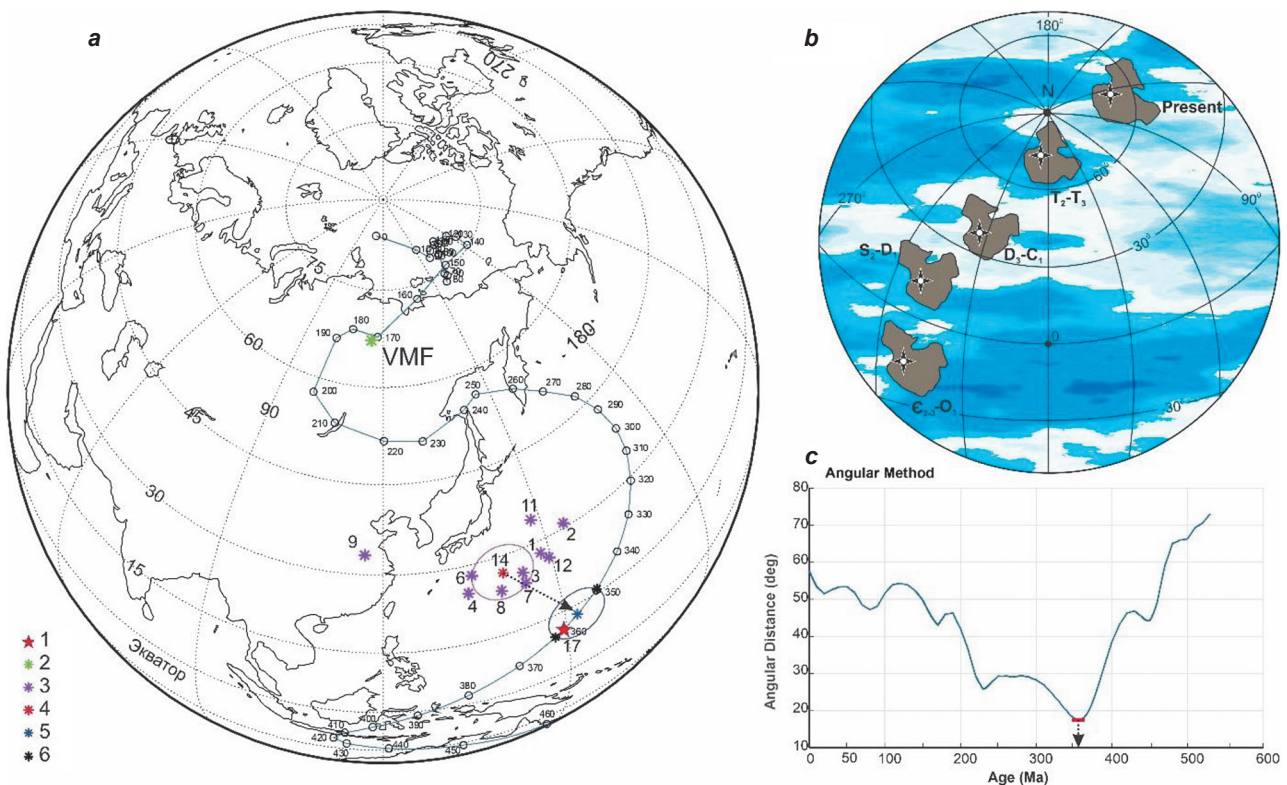


Fig. 13. Dynamic and geochronologic interpretation of paleomagnetic data obtained from kimberlites of the Verkhnemunskoe field:

a – comparison of kimberlites virtual geomagnetic poles (numbers correspond to Table 3) with apparent polar wander paths of the Siberian Platform [5] according to the method [62]:

1 – paleomagnetic pole PZ2 [41], 2 – Verkhnemunskoe field, 3 – virtual geomagnetic poles (numbers correspond to Table 3), 4 – paleomagnetic pole of kimberlites (No. 14 in Table 3), 5 – paleomagnetic date; 6 – error in determining the paleomagnetic age;

b – paleomagnetic reconstructions of the Siberian Platform in the Paleozoic – Early Mesozoic;

c – paleomagnetic dating of kimberlites (graph of dependence of the deviation of the paleomagnetic pole coordinates and the baseline paleomagnetic trajectory)

Рис. 13. Динамическая и геохронологическая интерпретация палеомагнитных данных, полученных по кимберлитам Верхне-Мунского месторождения:

a – сопоставление виртуальных геомагнитных полюсов кимберлитов (номера соответствуют табл. 3) с траекторией кажущейся миграции полюса Сибирской платформы [5] по методике, описанной в источнике [62]:

1 – палеомагнитный полюс PZ2 [41], 2 – Верхне-Мунское поле, 3 – виртуальные геомагнитные полюсы (номера соответствуют табл. 3), 4 – палеомагнитный полюс кимберлитов (№ 14 в табл. 3), 5 – палеомагнитная дата, 6 – погрешность определения палеомагнитного возраста;

b – палеомагнитные реконструкции Сибирской платформы в палеозое – раннем мезозое;

c – палеомагнитное датирование кимберлитов (график зависимости отклонения координат палеомагнитного полюса и базовой палеомагнитной траектории)

Platform was located in the northern hemisphere at latitudes from 30 to 50° and was facing north with its southern flank (Fig. 13, b).

Conclusions

For the first time petro- and paleomagnetic data were obtained for kimberlite pipes of the Verkhnemunskoe deposit which significantly supplemented knowledge of the paleomagnetism of kimberlites of the YaDP [39–46, 59, 63]. This is mainly necessary for:

1. Construction of a priori PhGM to develop a correct methodology for searching for kimberlite pipes using geophysical methods. It should be noted

that the amplitude, nature and size of magnetic anomalies (see Fig. 6) allow effective detection of kimberlite pipes by means of detailed magnetic survey which is most expedient to be carried out in the variant with the use of unmanned aerial vehicle (UAV) on the largest scale taking into account the current level of magnetic exploration – 1:500–1:2000 [64, 65]. Unfortunately, at the moment we do not have similar in performance UAV-gravimagnetic survey technologies that provide the necessary sensitivity but it is hoped that in the near future it will be possible to conduct complex UAV-gravimagnetic surveys which will allow us to solve the problem of search with maximum reliability.



2. PMP calculations to clarify the Late Devonian-Early Carboniferous (360±10 Ma) APWP interval of the Siberian Platform.

3. Constructions of dynamic PhGM in order to test hypotheses of kimberlite intrusion on the Siberian Platform.

Due to the specifics of the formation kimberlites are complex objects of paleomagnetic studies and for this reason many methodological techniques for them may be ineffective for solving geological problems. Therefore, as recommendations for improving the quality of paleomagnetic studies of kimberlites it is necessary firstly to conduct a correct selection of oriented samples not only from the bedrock body itself but also from the host (from the contact and at a considerable distance) overlying rocks and xenoliths. It is desirable to select edge and center pieces if they have large dimensions. Secondly, the evidence of the nature

of the obtained NRM vectors should be based on a complex of studies including petrography, mineralogy (including magnetic), geochemistry, magnetic susceptibility anisotropy, componental paleomagnetic analysis, etc. Statistical methods of proving the nature of NRM are of particular importance: tests of xenoliths (conglomerates), baking (contact) and folds (host rocks). Thirdly, we should not forget that the magnetization of a kimberlite pipe can be associated with a paleomagnetic anomaly (excursion). Therefore, at least 7 pipes or kimberlite emplacement phases of one cluster/field are required to calculate the PMP. If such methodological requirements are met, the paleomagnetic data in combination with geological paleontological and isotopic studies will make it possible to definitely resolve the age of kimberlites which is a prerequisite for the prediction of primary diamond deposits in YaDP.

References

1. Khramov A.N., Goncharov G.I., Komissarova R.A., Pisarevskii S.A., Pogarskaya I.A., Rzhetskii Yu.S., et al. *Paleomagnetology*. Leningrad: Nedra; 1982, 312 p. (In Russ.).
2. Vakhromeev G.S., Davydenko A.Yu. *Modeling in exploration geophysics*. Moscow: Nedra; 1987, 194 p. (In Russ.).
3. Khramov A.N. *Standard series of paleomagnetic poles for the plates of northern Eurasia in relation to the problems of paleogeodynamics of the USSR territory*. In: *Paleomagnetism and Paleogeodynamics of the USSR Territory*. Leningrad: All-Russian Petroleum Research Geological Prospecting Institute; 1991, 125 p. (In Russ.).
4. Pecherskii D.M., Didenko A.N. *Paleoasian ocean: petromagnetic and paleomagnetic information on its lithosphere*. Moscow: Schmidt Institute of Physics of the Earth of the Russian Academy of Sciences; 1995, 298 p. (In Russ.).
5. Torsvik T.H., Van der Voo R., Preeden U., Niocaill C.M., Steinberger B., Doubrovine P.V., et al. Phanerozoic polar wander, palaeogeography and dynamics. *Earth-Science Reviews*. 2012;114(3-4):325-368. <https://doi.org/10.1016/j.earscirev.2012.06.007>.
6. Kuzmin M.I., Yarmolyuk V.V., Kravchinsky V.A. Phanerozoic hot spot traces and paleogeographic reconstructions of the Siberian continent based on interaction with the African large low shear velocity province. *Earth-Science Reviews*. 2010;102(1-2):29-59. <https://doi.org/10.1016/j.earscirev.2010.06.004>.
7. Zaitsev A.I., Smelov A.P. *Isotope geochronology of rocks of the kimberlite formation of the Yakutsk province*. Yakutsk: Ofset; 2010, 108 p. (In Russ.). EDN: QKJWHP.
8. Brakhfogel' F.F. *Geological aspects of kimberlite magmatism of the north-east of the Siberian platform*. Yakutsk: Yakut branch of the USSR Academy of Sciences; 1984, 128 p. (In Russ.).
9. Krivonos V.F. Relative and absolute age of kimberlites. *Otechestvennaya Geologiya = National Geology*. 1997;1:41-51. (In Russ.).
10. Sun J., Liu C-Z., Tappe S., Kostrovitsky S.I., Wu F-Y., Yakovlev D., et al. Repeated kimberlite magmatism beneath Yakutia and its relationship to Siberian flood volcanism: insights from in situ U, Pb and Sr, Nd perovskite isotope analysis. *Earth and Planetary Science Letters*. 2014;404:283-295. <https://doi.org/10.1016/j.epsl.2014.07.039>.
11. Kostrovitsky S.I., Yakovlev D.A. *Kimberlites of the Yakut kimberlite province: composition and genesis*. Novosibirsk: Siberian Branch of the Russian Academy of Sciences; 2022, 468 p. (In Russ.). <https://doi.org/10.53954/9785604788837>. EDN: CUVAHB.
12. Khar'kiv A.D., Zinchuk N.N., Kryuchkov A.I. *Diamond primary deposits of the word*. Moscow: Nedra; 1998, 555 p. (In Russ.). EDN: IYYNK.
13. Van der Voo R. The reliability of paleomagnetic data. *Tectonophysics*. 1990;184(1):1-9. [https://doi.org/10.1016/0040-1951\(90\)90116-P](https://doi.org/10.1016/0040-1951(90)90116-P).
14. Vladimirov B.M., Dauev Yu.M., Zubarev B.M., Kaminskii F.V., Minorin V.E., Prokopchuk B.I. *Diamond deposits of the USSR, prospecting and exploration methods. Part 1. Geology of diamond deposits in the USSR*. Moscow: Central Research Institute of Geological Prospecting for Base and Precious Metals; 1984, 435 p. (In Russ.).
15. Zankovich N.S., Rudakova G.N. New data on kimberlite petrography in the Upper Muna field pipes (Yakutia). In: Zinchuk N.N. (ed.). *Geologiya almazov – nastoyashchee i budushchee (geologi k 50-letnemu yubileyu g. Mirnogo i almazodobyvayushchei promyshlennosti Rossii) = Geology of diamonds – present and future (Geologists to the 50th anniversary of the city of Mirny and Russian diamond mining industry)*. Voronezh: Voronezh State University; 2005, p. 790-806. (In Russ.).



16. Spetsius Z.V., Taylor L.A. Kimberlite xenoliths as evidence for subducted oceanic crust in the formation of the Siberian craton. In: *Plumes and problem of deep sources of alkaline magmatism: proceedings of the 3^d International workshop*. Irkutsk: Irkutsk State Technical University; 2003, p. 5-19.
17. Lepekhina E., Rotman A., Antonov A., Sergeev S. SIMS SHRIMP U-Pb dating of perovskite from kimberlites of the Siberian platform (Verkhnemunskoe and Alakite- 161 Marhinskoe fields). *International Kimberlite Conference: proceedings of the 9th International conference*. Frankfurt: Elsevier; 2008, vol. 9. <https://doi.org/10.29173/ikc3571>.
18. Sun J., Tappe S., Kostrovitsky S.I., Liu C.-Z., Skuzovatov S.Yu., Wu F.-Y. Mantle sources of kimberlites through time: A U-Pb and Lu-Hf isotope study of zircon megacrysts from the Siberian diamond fields. *Chemical Geology*. 2018;479:228-240. <https://doi.org/10.1016/j.chemgeo.2018.01.013>.
19. Komarov A.N., Ilupin I.P. Geochronology of kimberlites of the Siberian Platform according to the track method data. *Geokhimiya*. 1990;3:365-372. (In Russ.).
20. Fefelov N.N., Kostrovitskii S.I., Zarudneva N.V. Pb isotopic composition in Russian kimberlites. *Geologiya i geofizika = Russian Geology and Geophysics*. 1992;33(11):102-107. (In Russ.).
21. Griffin W.L., Ryan C.G., Kaminsky F.V., Suzanne Y., Natapov L.M., Win T.T., et al. The Siberian lithosphere traverse: mantle terrains and the assembly of the Siberian Craton. *Tectonophysics*. 1999;310(1-4):1-35. [https://doi.org/10.1016/S0040-1951\(99\)00156-0](https://doi.org/10.1016/S0040-1951(99)00156-0).
22. Davis G.L., Sobolev N.V., Kharkiv A.D. New data on the age of Yakutian kimberlites obtained from the ratio of lead and uranium isotopes in zircons. *Doklady Akademii nauk SSSR*. 1980;254(1):175-179. (In Russ.).
23. Levchenkov O.A., Gaidamako I.M., Levskii L.K., Komarov A.N., Yakovleva S.Z., Rizvanova N.G., et al. U-Pb age of zircon from the Mir and 325 Let Yakutii pipes. *Doklady Akademii nauk*. 2005;400(2):233-235. (In Russ.). EDN: HSFQPD.
24. Lepekhina E., Rotman A., Antonov A., Sergeev S. SHRIMP U-Pb zircon ages of Yakutian kimberlite pipes. *International Kimberlite Conference: proceedings of the 9th International kimberlite conference*. Frankfurt: Elsevier; 2008, vol. 9. <https://doi.org/10.29173/ikc3572>.
25. Kostrovitsky S.I., Alymova N.V., Yakovlev D.A. Kimberlites and megacryst association of minerals, Sr-Nd systematics. In: *Izotopnye sistemy i vremya geologicheskikh protsessov: materialy IV ross. konf. po izotopnoi geokhronologii = Isotope systems and time of geological processes: proceedings of the 4th Russian conference on isotope geochronology*. 2–4 June 2009, Saint Petersburg. Saint Petersburg; 2009, vol. 1, p. 260-261. (In Russ.).
26. Agashev A.M., Pokhilenko N.P., Mal'kovets V.G., Sobolev N.V., Tolstov A.V., Polyanichko V.V. New age data on kimberlites from the Yakutian diamondiferous province. *Doklady Akademii nauk*. 2004;399(1):95-99. (In Russ.). EDN: OPTXGH.
27. Bobrievich A.P., Sobolev V.S. *Petrography and mineralogy of kimberlite rocks of Yakutia*. Moscow: Nedra; 1964, 192 p. (In Russ.).
28. Kostrovitsky S.I., Travin A.V., Alymova N.V., Yakovlev D.A. Phlogopite megacrysts from kimberlites, Ar-Ar age determinations. In: *Izotopnye sistemy i vremya geologicheskikh protsessov: materialy IV ross. konf. po izotopnoi geokhronologii = Isotope systems and time of geological processes: proceedings of the 4th Russian conference on isotope geochronology*. 2–4 June 2009, Saint Petersburg. Saint Petersburg; 2009, vol. 1, p. 263-265. (In Russ.).
29. Sarsadskikh N.N., Blagulkina V.A., Silin Yu.I. On the absolute age of Yakutian kimberlites. *Doklady Akademii nauk SSSR*. 1966;168(2):420-423. (In Russ.).
30. Kostrovitsky S.I., Solov'eva L.V., Yakovlev D.A., Suvorova L.F., Sandimirova G.P., Travin A.V., et al. Kimberlites and megacrystic suite: isotope-geochemical studies. *Petrology*. 2013;21(2):127-144. <https://doi.org/10.1134/S0869591113020057>.
31. Spetsius Z.V., Taylor L.A. *Diamonds of Siberia: photographic evidence for their origin*. Lenoir City: Tranquility Base Press; 2008. 278 p.
32. Zezekalo M.Yu., Spezius Z.V., Tarskikh O.V. On some material composition features of kimberlite pipes of the Verkhnemunskoe field. In: *Problemy prognozirovaniya i poiskov mestorozhdenii almazov na zakrytykh territoriyakh: materialy konf. = Forecasting and searching issues of diamond deposits in closed areas: proceedings of the conference*. 18–20 March 2008, Mirny. Mirny; 2008, p. 162-168. (In Russ.).
33. Scott Smith B.H., Nowicki T.E., Russell J.K., Webb K.J., Mitchell R.H., Hetman C.M., et al. *A glossary of kimberlite and related terms. Part 1*. North Vancouver: Scott-Smith Petrology Inc.; 2018. 144 p.
34. Kostrovitsky S.I., Yakovlev D.A., Morikiyo T., Serov I.V., Amirzhanov A.A. Isotope-geochemical systematics of kimberlites and related rocks from the Siberian platform. *Geologiya i geofizika = Russian Geology and Geophysics*. 2007;48(3):350-371. (In Russ.). EDN: IBCKOT.
35. Kostrovitskii S.I., Morikiyo T., Serov I.V., Rotman A.Ya. Origin of kimberlites: evidence from isotopic-geochemical data. *Doklady Akademii nauk*. 2004;399(2):236-240. (In Russ.). EDN: OPTYPH.
36. Yakovlev D.A., Kostrovitsky S.I., Fosu B.R., Ashchepkov I.V. Diamondiferous kimberlites from recently explored Upper Muna field (Siberian craton): petrology, mineralogy and geochemistry insights. *Geological Society of London, Special Publications*. 2021;513(1):71-102. <https://doi.org/10.1144/SP513-2021-9>.
37. Gernon T.M., Brown R.J., Tait M.A., Hincks T.K. The origin of pelletal lapilli in explosive kimberlite eruptions. *Nature Communications*. 2012;3:832. <https://doi.org/10.1038/ncomms1842>.
38. Zijderveld J.D.A. Demagnetization of rocks, analysis of results. In: Collinson D.W., Creer K.M., Runcorn S.K. (eds). *Methods in paleomagnetism*. Amsterdam: Elsevier; 1967, p. 254-286.
39. Savrasov D.I., Kamyshcheva G.G. Direction of remanent magnetization in kimberlites In: *Magnetizm gornykh porod i paleomagnetizm: materialy V Vsesoyuzn. konf. po paleomagnetizmu = Rock magnetism and paleomagnetism: proceedings of the 5th All-Union Conference on paleomagnetism*. 10–17 June 1962, Krasnoyarsk. Krasnoyarsk; 1963, p. 124-129. (In Russ.).



40. Zhitkov A.N., Savrasov D.I. Paleomagnetism and the ages of kimberlites exemplified by the four pipes of Yakutia. In: *Extended Abstracts: 6th International Conference*. Novosibirsk: United Institute of Geology, Geophysics and Mineralogy, Siberian Branch of Russian Academy of Sciences; 1995, vol. 6, p. 695-697. <https://doi.org/10.29173/ikc2018>.
41. Kravchinsky V.A., Konstantinov K.M., Courtillot V., Savrasov J.I., Valet J-P., Cherniy S.D., et al. Paleomagnetism of East Siberian traps and kimberlites: two new poles and paleogeographic reconstructions at about 360 and 250 Ma. *Geophysical Journal International*. 2002;148(1):1-33. <https://doi.org/10.1046/j.0956-540x.2001.01548.x>.
42. Konstantinov K.M. Age of natural remanent magnetization of kimberlites of the Yakut diamondiferous province. *Nauka i obrazovanie*. 2010;1:47-54. (In Russ.). EDN: LBECAL.
43. Konstantinov K.M., Zabelin A.V., Zaitsevskiy F.K., Konstantinov I.K., Kirguez A.A., Khoroshikh M.S. Structure and functions of the petromagnetic "Rsearch" database of the Yakut kimberlite province. *Geoinformatika*. 2018;4:30-39. (In Russ.). EDN: YPXHRB.
44. Tarling D.H., Hrouda F. *The magnetic anisotropy of rocks*. London: Chapman & Hall; 1993, 217 p.
45. Mitchell R.H. *Kimberlites: mineralogy, geochemistry and petrology*. New York: Plenum Press; 1986, 442 p.
46. 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*. 2018;1:67-77. (In Russ.). EDN: YWMSHU.
47. Konstantinov K.M., Khoroshikh M.S. Anisotropy of magnetic susceptibility of kimberlites. In: *Problemy geokosmosa: materialy XII Mezhdunar. konf. = Problems of geospace: proceedings of the 12th International conference*. 8–12 October 2018, Saint Petersburg. Saint Petersburg; 2018, p. 140-145. (In Russ.). EDN: SMYYOH.
48. Day R., Fuller M.D., Schmidt V.A. Hysteresis properties of titanomagnetites: grain size and composition dependence. *Physics of the Earth and Planetary Interiors*. 1977;13(4):260-267. [https://doi.org/10.1016/0031-9201\(77\)90108-X](https://doi.org/10.1016/0031-9201(77)90108-X).
49. Dunlop D.J., Ozdemir O. *Rock Magnetism. Fundamentals and frontiers*. Cambridge: Cambridge University Press; 1997, 573 p. <https://doi.org/10.1017/CBO9780511612794>.
50. McFadden P.L., McElhinny M.W. The combined analysis of remagnetization and direct observation in paleomagnetism. *Earth and Planetary Science Letters*. 1988;87(1-2):161-172. [https://doi.org/10.1016/0012-821X\(88\)90072-6](https://doi.org/10.1016/0012-821X(88)90072-6).
51. Borovikov V.P. *STATISTICA: the art of data analysis on computer. For professionals*. Saint Petersburg: Piter; 2001, 658 p. (In Russ.).
52. Vinarskii Y.S., Zhitkov A.N., Kravchinsky A.Y. *Automated system for processing paleomagnetic data of OPAL*. Moscow: All-Russian Institute of Economics of Mineral Raw Materials and Subsoil Use; 1987, 86 p. (In Russ.).
53. Enkin R.J. *A computer program package for analysis and presentation of paleomagnetic data*. Sidney: The Pacific Geoscience Centre; 1994, 16 p.
54. Jelinek V. Measuring anisotropy of magnetic susceptibility on a slowly spinning specimen – basic theory. Brno: Agico; 1997, 27 p.
55. Rodionov D.A. *Distribution functions of element and mineral content in igneous rocks*. Moscow: Nauka; 1964, 102 p. (In Russ.).
56. Kvachevskiy O.A. On the use of statistical analysis data on physical properties of rocks and ores to assess application potential of geophysical methods. In: *Voprosy razvitiya geofiziki = Issues of Geophysics Development*. Moscow: Research Centre of Applied Geophysics; 1968, iss. 7. (In Russ.).
57. Konstantinov K.M., Mishenin S.G., Savrasov D.I., Khuzin M.Z., Ubinin S.G., Tomshin M.D., et al. Development of petromagnetic legend of structural-material complexes of the Yakutsk diamondiferous province In: *Paleomagnetizm i magnetizm gornykh porod: teoriya, praktika, eksperiment = Paleomagnetism and magnetism of rocks: theory, practice, experiment: proceedings of the seminar*. 19–22 October 2006, Borok. Borok; 2006, p. 70-75. (In Russ.).
58. Trukhin V.I., Zhilyaeva V.A., Zinchuk N.N., Romanov N.N. *Magnetism of kimberlites and traps*. Moscow: Moscow State University; 1989, 165 p. (In Russ.).
59. 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.
60. Konstantinov I.K., Khuzin M.Z., Konstantinov K.M. Paleomagnetic studies of the Upper Cambrian Verkholsk Formation rocks (south of the Siberian Craton). *Nauka i obrazovanie*. 2011;3:10-15. (In Russ.). EDN: OGGYPJ.
61. Milashev V.A. *Physical and chemical conditions of kimberlite formation*. Leningrad: Nedra; 1972, 175 p. (In Russ.).
62. Hnatyshin D., Kravchinsky V.A. Paleomagnetic dating: methods, MATLAB software, example. *Tectonophysics*. 2014;630:103-112. <https://doi.org/10.1016/j.tecto.2014.05.013>.
63. Blanco D., Kravchinsky V.A., Konstantinov K.M., Kabin K. Paleomagnetic dating of Phanerozoic kimberlites in Siberia. *Journal of Applied Geophysics*. 2013;88:139-153. <https://doi.org/10.1016/j.jappgeo.2012.11.002>.
64. 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 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.
65. 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.



Список источников

1. Храмов А.Н., Гончаров Г.И., Комиссарова Р.А., Писаревский С.А., Погарская И.А., Ржевский Ю.С. [и др.]. Палеомагнитология. Л.: Недра, 1982. 312 с.
2. Вахромеев Г.С., Давыденко А.Ю. Моделирование в разведочной геофизике. М.: Недра, 1987. 194 с.
3. Храмов А.Н. Стандартные ряды палеомагнитных полюсов для плит северной Евразии: связь с проблемами палеогеодинамики территории СССР // Палеомагнетизм и палеогеодинамика территории СССР. Л.: Изд-во ВНИГРИ, 1991. 125 с.
4. Печерский Д.М., Диденко А.Н. Палеоазиатский океан: петромагнитная и палеомагнитная информация о его литосфере: монография. М.: Изд-во ИФЗ РАН, 1995. 298 с.
5. Torsvik T.H., Van der Voo R., Preeden U., Niocaill C.M., Steinberger B., Doubrovine P.V., et al. Phanerozoic polar wander, palaeogeography and dynamics // *Earth-Science Reviews*. 2012. Vol. 114. Iss. 3–4. P. 325–368. <https://doi.org/10.1016/j.earscirev.2012.06.007>.
6. Kuzmin M.I., Yarmolyuk V.V., Kravchinsky V.A. Phanerozoic hot spot traces and paleogeographic reconstructions of the Siberian continent based on interaction with the African large low shear velocity province // *Earth-Science Reviews*. 2010. Vol. 102. Iss. 1–2. P. 29–59. <https://doi.org/10.1016/j.earscirev.2010.06.004>.
7. Зайцев А.И., Смелов А.П. Изотопная геохронология пород кимберлитовой формации Якутской провинции: монография. Якутск: Офсет, 2010. 108 с. EDN: QKJWHP.
8. Брахофельд Ф.Ф. Геологические аспекты кимберлитового магматизма северо-востока Сибирской платформы. Якутск: Изд-во ЯФ СО АН СССР, 1984. 128 с.
9. Кривонос В.Ф. Относительный и абсолютный возраст кимберлитов // *Отечественная геология*. 1997. № 1. С. 41–51.
10. Sun J., Liu C-Z., Tappe S., Kostrovitsky S.I., Wu F-Y., Yakovlev D., et al. Repeated kimberlite magmatism beneath Yakutia and its relationship to Siberian flood volcanism: insights from in situ U, Pb and Sr, Nd perovskite isotope analysis // *Earth and Planetary Science Letters*. 2014. Vol. 404. P. 283–295. <https://doi.org/10.1016/j.epsl.2014.07.039>.
11. Костровицкий С.И., Яковлев Д.А. Кимберлиты Якутской кимберлитовой провинции (состав и генезис). Новосибирск: Изд-во СО РАН, 2022. 468 с. <https://doi.org/10.53954/9785604788837>. EDN: CUVAHB.
12. Харьков А.Д., Зинчук Н.Н., Крючков А.И. Коренные месторождения алмазов мира. М.: Недра, 1998. 555 с. EDN: IYYNKK.
13. Van der Voo R. The reliability of paleomagnetic data // *Tectonophysics*. 1990. Vol. 184. Iss. 1. P. 1–9. [https://doi.org/10.1016/0040-1951\(90\)90116-P](https://doi.org/10.1016/0040-1951(90)90116-P).
14. Владимиров Б.М., Дауев Ю.М., Зубарев Б.М., Каминский Ф.В., Минорин В.Е., Прокопчук Б.И. [и др.]. Месторождения алмазов СССР, методика поисков и разведки. Ч. 1. Геология месторождений алмазов СССР. М.: Изд-во ЦНИГРИ, 1984. 435 с.
15. Занкович Н.С., Рудакова Г.Н. Новые данные о петрографии кимберлитов трубок Верхне-Мунского поля (Якутия) // *Геология алмазов – настоящее и будущее (геологи к 50-летию юбилею г. Мирного и алмазодобывающей промышленности России): сб. статей / под ред. Н.Н. Зинчук. Воронеж: Изд-во ВГУ, 2005. С. 790–806.*
16. Spetsius Z.V., Taylor L.A. Kimberlite xenoliths as evidence for subducted oceanic crust in the formation of the Siberian craton // *Plumes and problem of deep sources of alkaline magmatism: proceedings of the 3^d International workshop*. Irkutsk: Irkutsk State Technical University, 2003. P. 5–19.
17. Lepekina E., Rotman A., Antonov A., Sergeev S. SIMS SHRIMP U-Pb dating of perovskite from kimberlites of the Siberian platform (Verhne-Munskoe and Alakite- 161 Marhinskoe fields) // *International Kimberlite Conference: proceedings of the 9th International conference*. Frankfurt: Elsevier, 2008. Vol. 9. <https://doi.org/10.29173/ikc3571>.
18. Sun J., Tappe S., Kostrovitsky S.I., Liu C-Z., Skuzovatov S.Yu., Wu F-Y. Mantle sources of kimberlites through time: A U-Pb and Lu-Hf isotope study of zircon megacrysts from the Siberian diamond fields // *Chemical Geology*. 2018. Vol. 479. P. 228–240. <https://doi.org/10.1016/j.chemgeo.2018.01.013>.
19. Комаров А.Н., Илупин И.П. Геохронология кимберлитов Сибирской платформы по данным метода треков // *Геохимия*. 1990. № 3. С. 365–372.
20. Фефелов Н.Н., Костровицкий С.И., Заруднева Н.В. Изотопный состав Pb в кимберлитах России // *Геология и геофизика*. 1992. Т. 33. № 11. С. 102–107.
21. Griffin W.L., Ryan C.G., Kaminsky F.V., Suzanne Y., Natapov L.M., Win T.T., et al. The Siberian lithosphere traverse: mantle terrains and the assembly of the Siberian Craton // *Tectonophysics*. 1999. Vol. 310. Iss. 1–4. P. 1–35. [https://doi.org/10.1016/S0040-1951\(99\)00156-0](https://doi.org/10.1016/S0040-1951(99)00156-0).
22. Дэвис Г.Л., Соболев Н.В., Харьков А.Д. Новые данные о возрасте кимберлитов Якутии, полученные по соотношению изотопов свинца и урана в цирконах // *Доклады Академии Наук СССР*. 1980. Т. 254. № 1. С. 175–179.
23. Левченков О.А., Гайдамака И.М., Левский Л.К., Комаров А.Н., Яковлева С.З., Ризванова Н.Г. [и др.]. U-Pb-возраст циркона из кимберлитовых трубок Мир и 325 лет Якутии // *Доклады Академии Наук*. 2005. Т. 400. № 2. С. 233–235. EDN: HSFQPD.
24. Lepekina E., Rotman A., Antonov A., Sergeev S. SHRIMP U-Pb zircon ages of Yakutian kimberlite pipes // *International Kimberlite Conference: proceedings of the 9th International kimberlite conference*. Frankfurt: Elsevier, 2008. Vol. 9. <https://doi.org/10.29173/ikc3572>.
25. Костровицкий С.И., Алымова Н.В., Яковлев Д.А. Кимберлиты и мегакристная ассоциация минералов, Sr-Nd систематика // *Изотопные системы и время геологических процессов: материалы IV рос. конф. по изотопной геохронологии (г. Санкт-Петербург, 2–4 июня 2009 г.)*. Санкт-Петербург, 2009. Т. 1. С. 260–261.



26. Агашев А.М., Похиленко Н.П., Толстов А.В., Поляничко В.В., Мальковец В.Г., Соболев Н.В. Новые данные о возрасте кимберлитов Якутской алмазоносной провинции // Доклады Академии наук. 2004. Т. 399. № 1. С. 95–99. EDN: OPTXGH.
27. Бобриевич А.П., Соболев В.С. Петрография и минералогия кимберлитовых пород Якутии. М.: Недра, 1964. 192 с.
28. Костровицкий С.И., Травин А.В., Алымова Н.В., Яковлев Д.А. Мегакристы флогопита из кимберлитов, Ar-Ar возрастные определения // Изотопные системы и время геологических процессов: материалы IV росс. конф. по изотопной геохронологии (г. Санкт-Петербург, 2–4 июня 2009 г.). Санкт-Петербург, 2009. Т. 1. С. 263–265.
29. Сарсадских Н.Н., Благулькина В.А., Силин Ю.И. Об абсолютном возрасте кимберлитов Якутии // Доклады Академии наук СССР. 1966. Т. 168. № 2. С. 420–423.
30. Kostrovitsky S.I., Solov'eva L.V., Yakovlev D.A., Suvorova L.F., Sandimirova G.P., Travin A.V., et al. Kimberlites and megacrystic suite: isotope-geochemical studies // *Petrology*. 2013. Vol. 21. Iss. 2. P. 127–144. <https://doi.org/10.1134/S0869591113020057>.
31. Spetsius Z.V., Taylor L.A. *Diamonds of Siberia: photographic evidence for their origin*. Lenoir City: Tranquility Base Press, 2008. 278 p.
32. Зезекало М.Ю., Специус З.В., Тарских О.В. О некоторых особенностях вещественного состава кимберлитовых трубок Верхнемунского поля // Проблемы прогнозирования и поисков месторождений алмазов на закрытых территориях: материалы конф. (г. Мирный, 18–20 марта 2008 г.). Мирный, 2008. Т. 1. С. 162–168.
33. Scott Smith B.H., Nowicki T.E., Russell J.K., Webb K.J., Mitchell R.H., Hetman C.M., et al. A glossary of kimberlite and related terms. Part 1. North Vancouver: Scott-Smith Petrology Inc., 2018. 144 p.
34. Костровицкий С.И., Морикио Т., Серов И.В., Яковлев Д.А., Амиржанов А.А. Изотопно-геохимическая систематика кимберлитов Сибирской платформы // Геология и геофизика. 2007. Т. 48. № 3. С. 350–371. EDN: IBCKOT.
35. Костровицкий С.И., Морикио Т., Серов И.В., Ротман А.Я. О происхождении кимберлитов (анализ изотопно-геохимических данных) // Доклады Академии наук. 2004. Т. 399. № 2. С. 236–240. EDN: OPTYPH.
36. Yakovlev D.A., Kostrovitsky S.I., Fosu B.R., Ashchepkov I.V. Diamondiferous kimberlites from recently explored Upper Muna field (Siberian craton): petrology, mineralogy and geochemistry insights // *Geological Society of London, Special Publications*. 2021. Vol. 513. Iss. 1. P. 71–102. <https://doi.org/10.1144/SP513-2021-9>.
37. Gernon T.M., Brown R.J., Tait M.A., Hincks T.K. The origin of pelletal lapilli in explosive kimberlite eruptions // *Nature Communications*. 2012. Vol. 3. P. 832. <https://doi.org/10.1038/ncomms1842>.
38. Zijdeveld J.D.A. Demagnetization of rocks, analysis of results // *Methods in paleomagnetism* / eds D.W. Collinson, K.M. Creer, S.K. Runcorn. Amsterdam: Elsevier, 1967. P. 254–286.
39. Саврасов Д.И., Камышева Г.Г. Направление остаточной намагниченности в кимберлитах // Магнетизм горных пород и палеомагнетизм: материалы V Всесоюз. конф. по палеомагнетизму (г. Красноярск, 10–17 июня 1962 г.). Красноярск, 1963. Т. 1. С. 124–129.
40. Zhitkov A.N., Savrasov D.I. Paleomagnetism and the ages of kimberlites exemplified by the four pipes of Yakutia // *Extended Abstracts: 6th Intern. conf. Novosibirsk: United Institute of Geology, Geophysics and Mineralogy, Siberian Branch of Russian Academy of Sciences*, 1995. Vol. 6. P. 695–697. <https://doi.org/10.29173/ikc2018>.
41. Kravchinsky V.A., Konstantinov K.M., Courtillot V., Savrasov J.I., Valet J.-P., Cherniy S.D., et al. Paleomagnetism of East Siberian traps and kimberlites: two new poles and paleogeographic reconstructions at about 360 and 250 Ma // *Geophysical Journal International*. 2002. Vol. 148. Iss. 1. P. 1–33. <https://doi.org/10.1046/j.0956-540x.2001.01548.x>.
42. Константинов К.М. Возраст естественной остаточной намагниченности кимберлитов Якутской алмазоносной провинции // Наука и образование. 2010. № 1. С. 47–54. EDN: LBECAL.
43. Константинов К.М., Забелин А.В., Зайцевский Ф.К., Константинов И.К., Киргуев А.А., Хороших М.С. Структура и функции петромагнитной базы данных «RSEARCH» Якутской кимберлитовой провинции // Геоинформатика. 2018. № 4. С. 30–39. EDN: YPXHRB.
44. Tarling D.H., Hrouda F. *The magnetic anisotropy of rocks*. London: Chapman & Hall, 1993. 217 p.
45. Mitchell R.H. *Kimberlites: mineralogy, geochemistry and petrology*. New York: Plenum Press, 1986. 442 p.
46. 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.
47. Константинов К.М., Хороших М.С. Анизотропия магнитной восприимчивости кимберлитов // Проблемы геокосмоса: материалы XII Междунар. конф. (г. Санкт-Петербург, 8–12 октября 2018 г.). Санкт-Петербург, 2018. С. 140–145. EDN: SMYYOH.
48. Day R., Fuller M.D., Schmidt V.A. Hysteresis properties of titanomagnetites: grain size and composition dependence // *Physics of the Earth and Planetary Interiors*. 1977. Vol. 13. Iss. 4. P. 260–267. [https://doi.org/10.1016/0031-9201\(77\)90108-X](https://doi.org/10.1016/0031-9201(77)90108-X).
49. Dunlop D.J., Ozdemir O. *Rock Magnetism. Fundamentals and frontiers*. Cambridge: Cambridge University Press, 1997. 573 p. <https://doi.org/10.1017/CBO9780511612794>.
50. McFadden P.L., McElhinny M.W. The combined analysis of remagnetization and direct observation in paleomagnetism // *Earth and Planetary Science Letters*. 1988. Vol. 87. Iss. 1–2. P. 161–172. [https://doi.org/10.1016/0012-821X\(88\)90072-6](https://doi.org/10.1016/0012-821X(88)90072-6).
51. Боровиков В.П. STATISTICA: искусство анализа данных на компьютере. Для профессионалов. СПб.: Питер, 2001. 658 с.
52. Винарский Я.С., Житков А.Н., Кравчинский А.Я. Автоматизированная система обработки палеомагнитных данных ОПАЛ. М.: Изд-во ВИЭМС, 1987. 86 с.



53. Enkin R.J. A computer program package for analysis and presentation of paleomagnetic data. Sidney: The Pacific Geoscience Centre, 1994. 16 p.
54. Jelinek V. Measuring anisotropy of magnetic susceptibility on a slowly spinning specimen – basic theory. Brno: Agico, 1997. 27 p.
55. Родионов Д.А. Функции распределения содержаний элементов и минералов в изверженных горных породах. М.: Наука, 1964. 102 с.
56. Квачевский О.А. Об использовании данных статистического анализа физических свойств пород и руд для оценки возможностей применения геофизических методов // Вопросы развития геофизики: сб. статей. М.: Изд-во ВИРГ, 1968. Вып. 7.
57. Константинов К.М., Мишенин С.Г., Саврасов Д.И., Хузин М.З., Убинин С.Г., Томшин М.Д. [и др.]. Разработка петромагнитной легенды структурно-вещественных комплексов Якутской алмазоносной провинции // Палеомагнетизм и магнетизм горных пород: теория, практика, эксперимент: материалы семинара. (пос. Борок, 19–22 октября 2006 г.). Борок, 2006. С. 70–75.
58. Трухин В.И., Жилыева В.А., Зинчук Н.Н., Романов Н.Н. Магнетизм кимберлитов и траппов. М.: Изд-во МГУ, 1989. 165 с.
59. 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.
60. Константинов И.К., Хузин М.З., Константинов К.М. Палеомагнитные исследования пород верхолонской свиты верхнего кембрия (юг Сибирского кратона) // Наука и образование. 2011. № 3. С. 10–15. EDN: OGGYPJ.
61. Милашев В.А. Физико-химические условия образования кимберлитов. Л.: Недра, 1972. 175 с.
62. Hnatyshin D., Kravchinsky V.A. Paleomagnetic dating: methods, MATLAB software, example // Tectonophysics. 2014. Vol. 630. P. 103–112. <https://doi.org/10.1016/j.tecto.2014.05.013>.
63. Blanco D., Kravchinsky V.A., Konstantinov K.M., Kabin K. Paleomagnetic dating of Phanerozoic kimberlites in Siberia // Journal of Applied Geophysics. 2013. Vol. 88. P. 139–153. <https://doi.org/10.1016/j.jappgeo.2012.11.002>.
64. 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.
65. 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.

Information about the authors / Информация об авторах



Maksim S. Khoroshikh,
Senior Mining Engineer,
JSC Gold Mining Company “Lenzoloto”,
Bodaibo, Russia,
horoshix1991@mail.ru
<https://orcid.org/0000-0002-0688-2249>
Хороших Максим Сергеевич,
старший горный инженер,
ПАО «Лензолото»,
г. Бодайбо, Россия,
horoshix1991@mail.ru
<https://orcid.org/0000-0002-0688-2249>



Konstantin M. Konstantinov,
Dr. Sci. (Geol. & Mineral.),
Head of the Geophysics Department,
Siberian School of Geosciences,
Irkutsk National Research Technical University,
Irkutsk, Russia,
konstantinovkm@ex.istu.edu
<https://orcid.org/0000-0002-1196-8776>
Константинов Константин Михайлович,
доктор геолого-минералогических наук,
руководитель департамента геофизики,
институт «Сибирская школа геонаук»,
Иркутский национальный исследовательский технический университет,
г. Иркутск, Россия,
konstantinovkm@ex.istu.edu
<https://orcid.org/0000-0002-1196-8776>

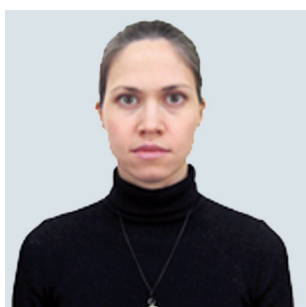


Igor S. Sharygin,

Cand. Sci. (Geol. & Mineral.),
Head of the Laboratory of Petrology, Geochemistry and Ore Genesis,
Institute of the Earth's Crust SB RAS,
Irkutsk, Russia
isharygin@crust.irk.ru
<https://orcid.org/0000-0002-2722-4958>

Шарыгин Игорь Сергеевич,

кандидат геолого-минералогических наук,
заведующий лабораторией петрологии, геохимии и рудогенеза,
Институт земной коры СО РАН,
г. Иркутск, Россия,
isharygin@crust.irk.ru
<https://orcid.org/0000-0002-2722-4958>

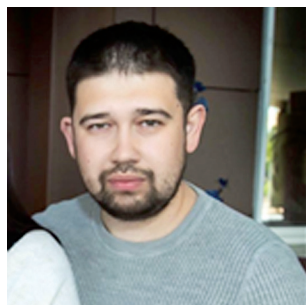


Dilyara M. Kuzina,

Cand. Sci. (Geol. & Mineral.),
Senior Researcher,
Institute of Geology and Oil and Gas Technologies,
Kazan (Volga region) Federal University,
Kazan, Russia,
di.kuzina@gmail.com
<https://orcid.org/0000-0003-1626-4636>

Кузина Диляра Мтыгулловна,

кандидат геолого-минералогических наук,
старший научный сотрудник,
Институт геологии и нефтегазовых технологий,
Казанский (Приволжский) федеральный университет,
г. Казань, Россия,
di.kuzina@gmail.com
<https://orcid.org/0000-0003-1626-4636>



Sergei V. Potapov,

Junior Researcher of the Laboratory of Petrology,
Geochemistry and Ore Genesis,
Institute of the Earth's Crust SB RAS,
Irkutsk, Russia,
potapovsv@crust.irk.ru
<https://orcid.org/0000-0001-8745-3376>

Потапов Сергей Владимирович,

младший научный сотрудник лаборатории петрологии,
геохимии и рудогенеза,
Институт земной коры СО РАН,
г. Иркутск, Россия,
potapovsv@crust.irk.ru
<https://orcid.org/0000-0001-8745-3376>



Diana Yu. Kokodey,

Student,
Siberian School of Geosciences,
Irkutsk National Research Technical University,
Irkutsk, Russia,
di_kokodey@geo.istu.edu
<https://orcid.org/0009-0009-6481-9633>

Кокодей Диана Юрьевна,

студент,
институт «Сибирская школа геонаук»,
Иркутский национальный исследовательский технический университет,
г. Иркутск, Россия,
di_kokodey@geo.istu.edu
<https://orcid.org/0009-0009-6481-9633>

**Contribution of the authors / Вклад авторов**

M.S. Khoroshikh did sampling, measured magnetic parameters, processed materials, performed the drawings and wrote the text of the article.

K.M. Konstantinov did sampling, analysed the materials, performed the drawings and wrote the text of the article.

I.S. Sharygin did sampling, was responsible for geological study, petrography, geochemistry.

D.M. Kuzina performed magneto-mineralogical studies.

S.V. Potapov carried out analytical studies.

D.Yu. Kokodey conducted petrophysical measurements.

М.С. Хороших – отбор образцов, измерения магнитных параметров, обработка материалов, подготовка рисунков, написание текста статьи.

К.М. Константинов – отбор образцов, анализ материалов, подготовка рисунков, написание текста статьи.

И.С. Шарыгин – отбор образцов, геологическое изучение, петрография, геохимия.

Д.М. Кузина – проведение магнито-минералогических исследований.

С.В. Потапов – проведение аналитических исследований.

Д.Ю. Кокодей – осуществление петрофизических измерений.

Conflict of interests / Конфликт интересов

The authors declare no conflicts of interest.

Авторы заявляют об отсутствии конфликта интересов.

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

Все авторы прочитали и одобрили окончательный вариант рукописи.

Information about the article / Информация о статье

The article was submitted 15.01.2024; approved after reviewing 25.02.2024; accepted for publication 04.03.2024.

Статья поступила в редакцию 15.01.2024; одобрена после рецензирования 25.02.2024; принята к публикации 04.03.2024.



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».

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

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

Все надписи на рисунках должны быть редактируемыми и выполненными 8 кеглем шрифта Arial (основной) на языке текста статьи. В некоторых случаях размер шрифта может быть уменьшен до 5-6 pt. Если на рисунке имеются условные обозначения, они должны быть пронумерованы, а их расшифровку стоит выносить в экспликацию к рисунку. Буквенная нумерация рисунков выполняется 10 кеглем шрифта Arial (полужирный курсив) на английском языке. Помимо представления в тексте статьи рисунки должны быть дополнительно предоставлены отдельными файлами. Векторная графика дополнительно предоставляется в форматах CDR, AI с возможностью редактирования, при экспорте из других программ следует использовать формат



PostScript (EPS) с разрешением 300 dpi. Фотографии, сканированные материалы представляются в формате TIFF или PNG/JPEG (сохранение в формате PNG/JPEG необходимо производить в максимально высоком качестве). Разрешение растровой графики должно составлять не менее 600 dpi для черно-белых рисунков и не менее 300 dpi для фотографий. Схемы, графики, диаграммы предоставляются с расширением .xls (MS Excel).

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

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

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

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

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

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

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

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

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

19. Представленные статьи проходят проверку на наличие заимствований.

20. Журнал выпускается с периодичностью 4 номера в год.

Внимание! Публикация статей является бесплатной.

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

По вопросам публикации обращаться по адресу: 664074, Россия, г. Иркутск, ул. Академика Курчатова, 3, каб. 207 (институт «Сибирская школа геонаук», Иркутский национальный исследовательский технический университет).

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

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

Статьи следует направлять ответственному секретарю Марии Николаевне Долгих через личный кабинет на сайте www.nznj.ru или по электронной почте nzn@istu.edu; тел.: +7 (952) 6214436, адрес: 664074, Россия, г. Иркутск, ул. Лермонтова, 83, ауд. 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^aНИИПИ «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^aNIPI 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 47 № 1 (86) 2024

Дизайнер А.А. Хохряков
Редактор Е.В. Шешуков
Перевод на английский язык В.В. Батицкой
Компьютерная верстка Ю.В. Макаровой

Издание распространяется бесплатно

Выход в свет 29.03.2024 г. Формат 60×90/8.
Бумага офсетная. Печать цифровая. Усл. печ. л. 17,25.
Тираж 500 экз. Зак. 13. 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

