



ВЕСТНИК
ДВО

ISSN 0869-7698 (Print)
ISSN 3034-5308 (Online)



Российская Академия Наук

ДАЛЬНЕВОСТОЧНОГО
ОТДЕЛЕНИЯ
РОССИЙСКОЙ
АКАДЕМИИ
НАУК

VESTNIK
OF THE FAR EAST
BRANCH
OF THE RUSSIAN
ACADEMY
OF SCIENCES

2025
5



НАУКА
— 1727 —



Научный журнал

Учредители

РАН

ДВО РАН

Журнал основан в 1932 г.

Издание прекращено в 1939 г.,
возобновлено в 1990 г.

ISSN 0869-7698 (Print)

ISSN 3034-5308 (Online)

ВЕСТНИК

ДАЛЬНЕВОСТОЧНОГО
ОТДЕЛЕНИЯ РОССИЙСКОЙ
АКАДЕМИИ НАУК /
VESTNIK OF THE FAR EAST
BRANCH OF THE RUSSIAN
ACADEMY OF SCIENCES

2025. 5(243)

СОДЕРЖАНИЕ

Науки о Земле и окружающей среде

В.Н. БАХТИНА, А.А. ГРЕБЕННИКОВА. Текстурно-структурные особенности руд Малиновского месторождения (Южный Сихотэ-Алинь, Дальний Восток России)	5
Е.В. ПЕРЕВОЗНИКОВА, В.Т. КАЗАЧЕНКО. Новые данные по минералогии марганцевосиликатных пород триасовой кремневой формации Сихотэ-Алиня	20
И.Ю. ЧЕКРЫЖОВ, И.А. ТАРАСЕНКО, С.И. АРБУЗОВ, Н.Ю. ПОПОВ. Ресурсы и добыча германия на Дальнем Востоке России: современное состояние, проблемы и перспективы	41
А.И. МАТВЕЕВА, А.В. РУСЛАН, Н.Ю. ПОПОВ. Особенности вещественного состава кайнозойских угленосных отложений Павловской впадины в связи с проблемой их металлоносности	53
А.А. ПАВЛОВ, И.В. БРАГИН, Г.А. ЧЕЛНОКОВ, Н.А. ХАРИТОНОВА. Геохимическая характеристика термального месторождения Бысса (Дальний Восток, Россия)	67
А.В. ВЕТОШКИНА, И.А. ТАРАСЕНКО, А.С. ХОЛОДОВ, Е.А. ВАХ. Оценка влияния объектов накопленного вреда на качество источников нецентрализованного водоснабжения поселка городского типа Ярославский (Приморский край, Россия)	78
М.В. МИХАЛЕВ, Л.Е. МУЗЫЧЕНКО, В.А. ЛОБКИНА. Дистанционный мониторинг снежной толщи с помощью температурной рейки	97
А.В. КОНОВАЛОВ, И.Д. ОРЛИН, Ю.А. СТЕПНОВА. Калибровка и апробация новой магнитудной шкалы на примере сильного корового землетрясения 01.01.2024 в Японии ($Mw = 7,5$)	104
А.Е. ДИДЕНКО, В.В. АНДРЕЕВ, А.А. ЧАШИН, А.А. КАРАБЦОВ, М.А. УШКОВА, О.О. ШИЧАЛИН, А.А. БЕЛОВ, Э.С. КОЛОДЕЗНИКОВ. Способ получения композиционного материала на основе базальта для его применения в художественной сфере	116

Главный редактор вице-президент РАН академик РАН Ю.Н. КУЛЬЧИН

Заместитель главного редактора В.С. ЖЕРДЕВ

Ответственный секретарь Л.А. РУСОВА

Редакционный совет:

акад. РАН Ю.Н. КУЛЬЧИН

акад. РАН В.В. БОГАТОВ

д.э.н. В.Л. ГУРСКИЙ

акад. РАН Г.И. ДОЛГИХ

чл.-корр. РАН С.П. КРЫЖАНОВСКИЙ

акад. РАН В.Л. ЛАРИН

д.э.н. О.М. ПРОКАПАЛО

акад. РАН В.И. СЕРГИЕНКО

акад. РАН В.Т. СИНЕГОВСКАЯ

чл.-корр. РАН А.А. ТУЛУПОВ

- Объединенный ученый совет по физико-математическим и техническим наукам, Владивосток
- Объединенный ученый совет по биологическим наукам, Владивосток
- Национальная академия наук Беларусь, Минск
- Объединенный ученый совет по наукам о Земле и окружающей среде, Владивосток
- Объединенный ученый совет по медицинским и физиологическим наукам, Владивосток
- Объединенный ученый совет по историко-филологическим наукам, Владивосток
- Объединенный ученый совет по общественным наукам, Хабаровск
- Объединенный ученый совет по химическим наукам, Владивосток
- Объединенный ученый совет по сельскохозяйственным наукам, Благовещенск
- Сибирское отделение РАН, Новосибирск

Редакционная коллегия:

акад. РАН А.В. АДРИАНОВ

чл.-корр. РАН Д.Л. АМИНИН

к.э.н. Ю.А. АВДЕЕВ

чл.-корр. РАН Т.А. АСЕЕВА

д.б.н. В.Ю. БАРКАЛОВ

акад. РАН В.В. БОГАТОВ

д.ф.-м.н. Л.М. БОГОМОЛОВ

чл.-корр. РАН С.Ю. БРАТСКАЯ

чл.-корр. РАН А.А. БУРЕНИН

чл.-корр. РАН Б.А. ВОРОНОВ

чл.-корр. РАН К.С. ГАНЗЕЙ

акад. РАН С.В. ГНЕДЕНКОВ

чл.-корр. РАН А.Г. ГОНЧАРОВ

кад. РАН Н.А. ГОРЯЧЕВ

чл.-корр. РАН В.В. ГРИБОВА

акад. РАН М.А. ГУЗЕВ

акад. РАН А.Н. ДИДЕНКО

д.ф.-м.н. В.П. ДЗЮБА

д.г.-м.н. О.В. ДУДАРЕВ

В.С. ЖЕРДЕВ

акад. РАН Ю.Н. ЖУРАВЛЕВ

д.х.н. А.И. КАЛИНОВСКИЙ

к.г.н. А.Н. КАЧУР

акад. РАН А.Г. КЛЫКОВ

д.ф.-м.н. Д.П. КОВАЛЕВ

чл.-корр. РАН Л.В. КОВТАНЮК

акад. РАН Н.Н. КРАДИН

чл.-корр. РАН П.В. КРЕСТОВ

акад. РАН Ю.Н. КУЛЬЧИН

д.б.н. А.С. ЛЕЛЕЙ

д.х.н. А.Г. МИРОЧНИК

чл.-корр. РАН А.Ю. ОЗЕРОВ

чл.-корр. РАН Ю.М. ПЕРЕЛЬМАН

чл.-корр. РАН С.В. ПРАНЦ

акад. РАН И.Ю. РАССКАЗОВ

чл.-корр. РАН Р.В. РОМАШКО

Л.А. РУСОВА

чл.-корр. РАН А.А. САРАНИН

акад. РАН С.И. СМАГИН

акад. РАН В.А. СТОНИК

чл.-корр. РАН Е.Я. ФРИСМАН

акад. РАН А.И. ХАНЧУК

д.г.-м.н. Р.Б. ШАКИРОВ

чл.-корр. РАН М.Ю. ЩЕРБАТИЮК

чл.-корр. РАН В.Б. ШУМАТОВ

- ННЦМБ им. А.В. Жирмунского ДВО РАН, Владивосток
- ТИБОХ им. Г.Б. Елякова ДВО РАН, Владивосток
- ТИГ ДВО РАН, Владивосток
- ДВНИИСХ, Хабаровск
- ФНЦ биоразнообразия наземной биоты Восточной Азии ДВО РАН, Владивосток
- заместитель главного редактора, ДВО РАН, Владивосток
- ИМГиГ ДВО РАН, Южно-Сахалинск
- ИХ ДВО РАН, Владивосток
- ИМиМ ДВО РАН, Комсомольск-на-Амуре
- ИВЭП ДВО РАН, Хабаровск
- ТИГ ДВО РАН, Владивосток
- ИХ ДВО РАН, Владивосток
- ФНЦ биоразнообразия наземной биоты Восточной Азии, Владивосток
- СВКНИИ им. Н.А. Шиля ДВО РАН, Магадан
- ИАПУ ДВО РАН, Владивосток
- ИПМ ДВО РАН, Владивосток
- ИТИГ им. Ю.А. Косыгина ДВО РАН
- ИАПУ ДВО РАН, Владивосток
- ТОИ им. В.И. Ильчева ДВО РАН, Владивосток
- заместитель главного редактора, РАН, Москва
- ФНЦ биоразнообразия наземной биоты Восточной Азии, Владивосток
- ТИБОХ им. Г.Б. Елякова ДВО РАН, Владивосток
- ТИГ ДВО РАН, Владивосток
- ФНЦ агробиотехнологий ДВ им. А.К. Чайки, Уссурийск
- ИМГиГ ДВО РАН, Южно-Сахалинск
- ИАПУ ДВО РАН, Владивосток
- ИИАЭ ДВО РАН, Владивосток
- БСИ ДВО РАН, Владивосток
- главный редактор, ДВО РАН, Владивосток
- ФНЦ биоразнообразия наземной биоты Восточной Азии ДВО РАН, Владивосток
- ИХ ДВО РАН, Владивосток
- ИВиС ДВО РАН, Петропавловск-Камчатский
- ДНЦ физиологии и патологии дыхания, Благовещенск
- ТОИ им. В.И. Ильичёва ДВО РАН, Владивосток
- ХФИЦ, Хабаровск
- ИАПУ ДВО РАН, Владивосток
- ответственный секретарь, РАН, Москва
- ИАПУ ДВО РАН, Владивосток
- ВЦ ДВО РАН, Владивосток
- ТИБОХ им. Г.Б. Елякова ДВО РАН, Владивосток
- ИКАРП ДВО РАН, Биробиджан
- ДВГИ ДВО РАН, Владивосток
- ТОИ им. В.И. Ильичёва ДВО РАН, Владивосток
- НИИ эпидемиологии и микробиологии им. Г.П. Сомова Роспотребнадзора, Владивосток
- ТГМУ, Владивосток



ВЕСТНИК

Scientific journal

Founders

RAS

FEB RAS

The journal was found in 1932

The publication was discontinued in 1939,
was resumed in 1990

ISSN 0869-7698 (Print)

ISSN 3034-5308 (Online)

ДАЛЬНЕВОСТОЧНОГО
ОТДЕЛЕНИЯ РОССИЙСКОЙ
АКАДЕМИИ НАУК /
VESTNIK OF THE FAR EAST
BRANCH OF THE RUSSIAN
ACADEMY OF SCIENCES

2025. 5(243)

CONTENTS

Earth and Environment Sciences

V.N. BAKHTINA, A.A. GREBENNIKOVA. Textural and structural features of ores of the Malinovskoye deposit (Southern Sikhote-Alin, Russian Far East).....	5
E.V. PEREVOZNIKOVA, V.T. KAZACHENKO. New data on mineralogy of manganesilicate rocks of triassic chert formation of the Sikhote-Alin.....	20
I.Yu. CHEKRYZHOB, I.A. TARASENKO, S.I. ARBUZOV, N.Yu. POPOV. Germanium resources and production in the Russian Far East: current status, problems and prospects	41
A.I. MATVEEVA, A.V. RUSLAN, N.Yu. POPOV. Peculiarities of the material composition of Cenozoic coal-bearing deposits of the Pavlovskaya depression in connection with the problem of their metal content.....	53
A.A. PAVLOV, I.V. BRAGIN, G.A. CHELNOKOV, N.A. KHARITONOV. Geochemical characteristics of the Byssa thermal deposit (Far East, Russia)	67
A.V. VETOSHKINA, I.A. TARASENKO, A.S. KHOLODOV, E.A. VAKH. Assessment of the impact of the objects of accumulated environmental damage on the quality of the decentralized water supply sources in Yaroslavsky settlement (Primorsky Territory, Russia).....	78
M.V. MIKHALEV, L.E. MUZYCHENKO, V.A. LOBKINA. Snow patch remote monitoring with the thermistor chain usage.....	97
A.V. KONOVALOV, I.D. ORLIN, Yu.A. STEPNOVA. Calibration and testing of a new magnitude scale: the case study of a strong crustal earthquake on 01.01.2024 in Japan (Mw = 7,5).....	104
A.E. DIDENKO, V.V. ANDREEV, A.A. CHASHCHIN, A.A. KARABTSOV, M.A. USHKOVA, O.O. SHICHALIN, A.A. BELOV, E.S. KOLODEZNIKOV. Method of obtaining composite material based on basalt for its use in the art field.....	116

Chief Editor Yury N. Kulchin, Academician of RAS, Vice-President of RAS

Deputy Chief Editor Vladimir S. ZHERDEV

Executive Secretary Larisa A. RUSOVA

Editorial Council:

Acad. of RAS YURY N. KULCHIN

Acad. of RAS VIKTOR V. BOGATOV

Doctor of Sciences (Economy) VASILY L. GURSKY

Acad. of RAS GRIGORY I. DOLGIKH

Corr. Member of RAS SERGEY P. KRYZHANOVSKY

Acad. of RAS VICTOR L. LARIN

Doctor of Sciences (Economy) OLGA M. PROKAPALO

Acad. of RAS VALENTIN I. SERGIENKO

Acad. of RAS VALENTINA T. SINEGOVSKAYA

Corr. Member of RAS ANDREY A. TULUPOV

- United Scientific Council for Physical, Mathematical and Technical Sciences, Vladivostok
- United Scientific Council for Biological Sciences, Vladivostok
- National Academy of Sciences of Belarus
- United Scientific Council for Earth and Environmental Sciences, Vladivostok
- United Scientific Council for Medical and Physiological Sciences, Vladivostok
- United Scientific Council for Historical and Philological Sciences, Vladivostok
- United Scientific Council for Social Sciences, Khabarovsk
- United Scientific Council for Chemical Sciences, Vladivostok
- United Scientific Council for Agricultural Sciences, Blagoveshchensk
- Siberian Branch of RAS, Novosibirsk

Editorial Board:

Acad. of RAS ANDREY V. ADRIANOV

Corr. Member of RAS DMITRY L. AMININ

Candidate of Sciences (Economy) YURY A. AVDEEV

Corr. Member of RAS TATIANA A. ASEEVA

Doctor of Sciences (Biology) VYACHESLAV Yu. BARKALOV

Acad. of RAS VIKTOR V. BOGATOV

Doctor of Sciences (Physics and Mathematics)

LEONID. M. BOGOMOLOV

Corr. Member of RAS SVETLANA Yu. BRATSKAYA

Corr. Member of RAS ANATOLY A. BURENIN

Corr. Member of RAS BORIS A. VORONOV

Corr. Member of RAS KIRILL S. GANZEY

Acad. of RAS SERGEY V. GNEDENKOV

Corr. Member of RAS ANDREY A. GONCHAROV

Acad. of RAS NIKOLAY A. GORYACHEV

Corr. Member of RAS VICTORIA V. GRIBOVA

Acad. of RAS MIKHAIL A. GUZEV

Acad. of RAS ALEKSEY N. DIDENKO

Doctor of Sciences (Physics and Mathematics)

VLADIMIR P. DZYUBA

Doctor of Sciences (Geology and Mineralogy)

OLEG V. DUDAREV

VLADIMIR S. ZHERDEV

Acad. of RAS YURY N. ZHURAVLEV

Doctor of Sciences (Chemistry) ANATOLY I. KALINOVSKY

Candidate of Sciences (Geography) ANATOLY N. KACHUR

Acad. of RAS ALEKSEY G. KLYKOV

Doctor of Sciences (Physics and Mathematics)

DMITRY P. KOVALEV

Corr. Member of RAS LARISA V. KOVTANYUK

Acad. of RAS NIKOLAY B. KRADIN

Corr. Member of RAS PAVEL V. KRESTOV

Acad. of RAS YURY N. KULCHIN

Doctor of Sciences (Biology) ARKADY S. LELEI

Doctor of Sciences (Chemistry) ANATOLY G. MIROCHNIK

Corr. Member of RAS ALEKSEY Yu. OZEROV

Corr. Member of RAS YULY M. PERELMAN

Corr. Member of RAS SERGEY V. PRANTS

Acad. of RAS IGOR Yu. RASSKAZOV

Corr. Member of RAS ROMAN V. ROMASHKO

LARISA A. RUSOVA

Corr. Member of RAS ALEKSANDR A. SARANIN

Acad. of RAS SERGEY I. SMAGIN

Acad. of RAS VALENTIN A. STONIK

Corr. Member of RAS EFIM Ya. FRISMAN

Acad. of RAS ALEKSANDR I. KHANCHUK

Doctor of Sciences (Geology and Mineralogy)

RENAT B. SHAKIROV

Corr. Member of RAS MIKHAIL Yu. SCHERBAYUK

Corr. Member of RAS VALENTIN B. SHUMATOV

- A.V. Zhirmunsky National Scientific Center of Marine Biology, FEB RAS, Vladivostok
- G.B. Elyakov Pacific Institute of Bioorganic Chemistry, FEB RAS, Vladivostok
- Pacific Geographical Institute, FEB RAS, Vladivostok
- Far Eastern Research Institute of Agriculture, Khabarovsk
- Federal Scientific Center of the East Asia Terrestrial Biodiversity, FEB RAS, Vladivostok
- Deputy Chief Editor, FEB RAS, Vladivostok
- Institute of Marine Geology and Geophysics, FEB RAS, Yuzhno-Sakhalinsk
- Institute of Chemistry, FEB RAS, Vladivostok
- Institute of Machinery and Metallurgy of FEB RAS – subdivision of KhFIC, FEB RAS, Komsomolsk-on-Amur
- Institute of Water and Ecological Problems of FEB RAS – subdivision of KhFIC, FEB RAS, Khabarovsk
- Pacific Geographical Institute, FEB RAS, Vladivostok
- Institute of Chemistry, FEB RAS, Vladivostok
- Federal Scientific Center of the East Asia Terrestrial Biodiversity, FEB RAS, Vladivostok
- N.A. Shilo North-East Interdisciplinary Research Institute, FEB RAS, Magadan
- Institute of Automation and Control Processes, FEB RAS, Vladivostok
- Institute of Applied Mathematics, FEB RAS, Vladivostok
- Y.A. Kosigin Institute of Tectonics and Geophysics, FEB RAS, Khabarovsk
- Institute of Automation and Control Processes, FEB RAS, Vladivostok
- V.I. Il'ichev Pacific Oceanological Institute, FEB RAS, Vladivostok
- Deputy Chief Editor, RAS, Moscow
- Federal Scientific Center of the East Asia Terrestrial Biodiversity, FEB RAS, Vladivostok
- G.B. Elyakov Pacific Institute of Bioorganic Chemistry, FEB RAS, Vladivostok
- Pacific Geographical Institute, FEB RAS, Vladivostok
- A.K. Chaika Federal Scientific Center for Agrobiotechnologies of the Far East, Ussuriisk
- Institute of Marine Geology and Geophysics, FEB RAS, Yuzhno-Sakhalinsk
- Institute of Automation and Control Processes, FEB RAS, Vladivostok
- Institute of History, Archaeology and Ethnography of the Peoples of the Far East, FEB RAS, Vladivostok
- Botanical Garden-Institute, FEB RAS, Vladivostok
- Chief Editor, Vladivostok
- Federal Scientific Center of the East Asia Terrestrial Biodiversity, FEB RAS, Vladivostok
- Institute of Chemistry, FEB RAS, Vladivostok
- Institute of Volcanology and Seismology FEB RAS, Petropavlovsk-Kamchatsky
- Far Eastern Scientific Center of Physiology and Respiration Pathology, Blagoveshchensk
- V.I. Il'ichev Pacific Oceanological Institute, FEB RAS, Vladivostok
- Khabarovsk Federal Research Center, FEB RAS, Khabarovsk
- Institute of Automation and Control Processes, FEB RAS, Vladivostok
- Executive Secretary, RAS, Moscow
- Institute of Automation and Control Processes, FEB RAS, Vladivostok
- Computing Center of FEB RAS – subdivision of KhFIC, FEB RAS, Khabarovsk
- G.B. Elyakov Pacific Institute of Bioorganic Chemistry, FEB RAS, Vladivostok
- Institute of Complex Analysis of Regional Problems, FEB RAS, Birobidzhan
- Far Eastern Geological Institute, FEB RAS, Vladivostok
- V.I. Il'ichev Pacific Oceanological Institute, FEB RAS, Vladivostok
- G.P. Somov Research Institute of Epidemiology and Microbiology, Rospotrebnadzor, Vladivostok
- Pacific State Medical University, Vladivostok

НАУКИ О ЗЕМЛЕ
И ОКРУЖАЮЩЕЙ СРЕДЕ

Научная статья

УДК 553.411 (235.47)

DOI: 10.7868/S3034530825050015

Текстурно-структурные особенности руд Малиновского месторождения (Южный Сихотэ-Алинь, Дальний Восток России)

В.Н. Бахтина[✉], А.А. Гребенникова

Виктория Николаевна Бахтина

аспирант, инженер-исследователь

Дальневосточный геологический институт ДВО РАН, Владивосток, Россия

bakhtina@fegi.ru

<https://orcid.org/0009-0002-3934-5455>

Анна Александровна Гребенникова

кандидат геолого-минералогических наук, старший научный сотрудник

Дальневосточный геологический институт ДВО РАН, Владивосток, Россия

anylotina@mail.ru

<https://orcid.org/0000-0002-3651-8050>

Аннотация. В работе представлены результаты исследования текстурно-структурных особенностей руд Малиновского месторождения (Южный Сихотэ-Алинь), относящегося к кварц-турмалин-сульфидной формации Au–Ві типа. Геологическая позиция и сложный состав руд объекта создают благоприятные условия для проявления широкого спектра текстур и структур. Установлено, что наиболее распространенными текстурами являются прожилково-вкрапленная, массивная и вкрапленная, среди выделенных видов структур – аллотриоморфно- и гипидиоморфнозернистая, гипидиоморфнometазернистая и порфирокластическая. Характерной особенностью являются их сложные сочетания с образованием комбинированных текстур и структур. Проведенные исследования подтверждают, что рудообразование на Малиновском месторождении протекало в условиях гидротермально-метасоматического процесса, осложненного интенсивными тектоническими деформациями. С технологической точки зрения перспективными для обогащения являются руды с массивными и прожилково-вкрапленными текстурами, содержащие крупнозернистые сульфиды и свободное золото. Особое внимание при разработке месторождения должно быть уделено контролю вредных примесей (As, Sb, глинистые минералы), существенно влияющих на технологический процесс. Рекомендуется дифференцированный подход к переработке различных типов руд с применением комбинированных методов (флотация + цианирование). Полученные результаты имеют важное значение для разработки критериев поиска и оценки подобных объектов с висмутовой минерализацией, а также для оптимизации технологических схем переработки руд.

Ключевые слова: золотовисмутовое оруденение, текстуры, структуры, месторождение Малиновское, Сихотэ-Алинь, Дальний Восток России

Для цитирования: Бахтина В.Н., Гребенникова А.А. Текстурно-структурные особенности руд Малиновского месторождения (Южный Сихотэ-Алинь, Дальний Восток России) // Вестн. ДВО РАН. 2025. № 5. С. 5–19. <http://dx.doi.org/10.7868/S3034530825050015>

Благодарности. Авторы выражают благодарность главному геологу ООО «Малиновское» К.Н. Добропольскому за предоставленный каменный материал и помощь в проведении полевых работ.

Финансирование. Работа выполнена в рамках государственного задания Минобрнауки России для ДВГИ ДВО РАН.

Original article

Textural and structural features of ores of the Malinovskoye deposit (Southern Sikhote-Alin, Russian Far East)

V.N. Bakhtina, A.A. Grebennikova

Viktoria N. Bakhtina

Postgraduate Student, Research Engineer
Far East Geological Institute, FEB RAS, Vladivostok, Russia
bakhtina@fegi.ru
<https://orcid.org/0009-0002-3934-5455>

Anna A. Grebennikova

Candidate of Sciences in Geology and Mineralogy, Senior Researcher
Far East Geological Institute, FEB RAS, Vladivostok, Russia
anylotina@mail.ru
<https://orcid.org/0000-0002-3651-8050>

Abstract. The paper presents the results of the study of textural and structural features of ores of the Malinovskoye deposit (South Sikhote-Alin), belonging to the quartz-tourmaline-sulphide formation of Au–Bi type. The geological position and complex composition of ores of the object create favourable conditions for the manifestation of a wide range of textures and structures. It was found that the most common textures are vein-embedded, massive and disseminated, among the identified types of structures are allotriomorphic and hypidiomorphic-grained, hypidiomorphic-metaserrine and porphyroclastic. The characteristic feature is their complex combinations with formation of combined textures and structures. The studies confirm that ore formation at the Malinovskoye deposit occurred in the conditions of hydrothermal-metasomatic process complicated by intensive tectonic deformations. From the technological point of view, ores with massive and vein-embedded textures containing coarse-grained sulphides and free gold are promising for beneficiation. Particular attention should be paid to the control of harmful impurities (As, Sb, clay minerals), which significantly affect the technological process. A differentiated approach to processing different types of ores using combined methods (flotation + cyanidation) is recommended. The results obtained are important for the development of search criteria and evaluation of similar objects with bismuth mineralization, as well as for the optimization of technological schemes of ore processing.

Keywords: gold-bismuth mineralization, textures, structures, Malinovskoye deposit, Sikhote-Alin, Russian Far East

For citation: Bakhtina V.N., Grebennikova A.A. Textural and structural features of ores of the Malinovskoye deposit (Southern Sikhote-Alin, Russian Far East). *Vestnik of the FEB RAS*. 2025;(5): 5–19. (In Russ.). <http://dx.doi.org/10.7868/S3034530825050015>

Acknowledgments. The authors express their gratitude to the chief geologist of Malinovskoye LLC K.N. Dobroshevsky for the provided stone material and assistance in carrying out field work.

Funding. The work was carried out within the framework of the state assignment of the Ministry of Science and Higher Education of the Russian Federation for the Far East Geological Institute, FEB RAS.

Введение

Изучение текстурно-структурных особенностей руд является неотъемлемой частью комплексного изучения руд и играет важную роль в определении генезиса месторождений, их технологических свойств и условий формирования. Текстуры и структуры руд отражают условия кристаллизации, метасоматических изменений, тектонических деформаций и последующих преобразований под воздействием различных физико-химических условий. Исследование этих особенностей позволяет реконструировать историю формирования месторождения и подобрать благоприятные схемы обогащения руд [1].

Малиновское месторождение расположено в Дальнереченском районе Приморского края. Оно является одним из представителей гидротермальных месторождений кварц-турмалин-сульфидной формации золотовисмутового геохимического типа в пределах Сихотэ-Алинской золотоносной провинции. Его геологическая позиция в зоне влияния Центрального Сихотэ-Алинского разлома и сложный состав руд создают благоприятные условия для проявления широкого спектра текстур и структур. В рудах месторождения преобладают прожилково-вкрапленные, массивные и вкрапленные текстуры, а также зернистые, коррозионные и катаклазические структуры. Золото преимущественно тонкодисперсное, находится в свободной форме и в ассоциации с арсенопиритом, халькопиритом и висмутовыми минералами [2–4].

Целью данной работы является систематизация и анализ текстурно-структурных особенностей руд Малиновского месторождения, выявление их связи с минеральным составом и условиями формирования. Результаты исследования имеют практическое применение при разработке технологий обогащения руд и эксплуатации Малиновского месторождения, а также при поиске и разведке подобных объектов с висмутовой минерализацией как на территории Сихотэ-Алиня, так и в пределах России. Исследование выполнено с применением микроскопического и рентгеноспектрального анализа, что обеспечило высокую достоверность полученных данных.

Краткая геологическая характеристика и минеральный состав руд Малиновского месторождения золота

Месторождение Малиновское расположено в одноименном рудном поле, в верховьях р. Малиновка. Его площадь составляет около 30 км². В геологическом строении района принимают участие аркозовые песчаники и алевролиты раннемелового возраста [2–4] синсдвигового турбидитового бассейна Журавлевско-Амурского террейна. От расположенного северо-западнее Самаркинского террейна он отделен системой разрывов крупного левостороннего сдвига – Центрального Сихотэ-Алинского разлома или одного из его ответвлений (рис. 1).

Выделено два комплекса магматических пород: раннемеловой (интрузивный татибинский: первая фаза – диориты, габбромонцодиориты; вторая фаза – биотитовые гранодиориты, граниты, лейкограниты) и раннепалеогеновый (вулканический богопольский – дайкиты, риодициты, их туфы, игнимбриты и др.) [2–5].

Структурное формирование месторождения напрямую связано с Центрально-Сихотэ-Алинской сдвиговой системой [6]. Следствием левостороннего движения блоков являются серии соединенных трещин растяжения, которые, вероятно, служили и рудоподводящими каналами [3, 4]. Некоторые исследователи считают, что образование Малиновской золоторудной магматической системы интрузивно-купольной структуры центрального типа (диаметром около 5 км) связано с внедрением Водораздельного интрузива габбромонцодиоритов татибинского комплекса [2, 6, 7]. Согласно датам U–Pb SHRIMP, возраст интрузива составляет 105–103 млн лет [7].

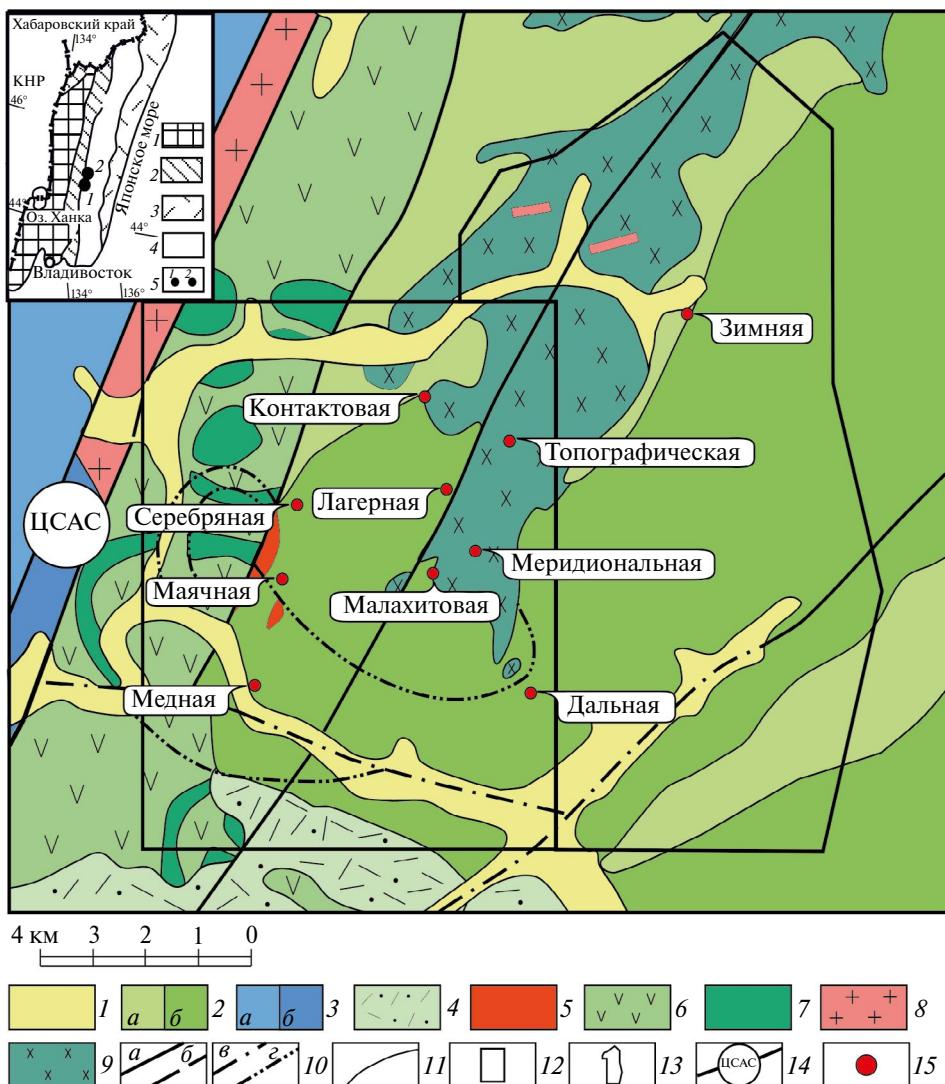


Рис. 1. Геологическая схема Малиновского рудного узла. Составлена по материалам Г.С. Белянского (2012 г.), В.А. Михайлова (1998 г.), К.Н. Дорошевского (2012 г.). 1 – четвертичные отложения (суглинки, супеси, гальки); 2 – нижнемеловые терригенные отложения Журавлевско-Амурского террейна: а – ключевская свита (песчаники, алевролиты, алевроаргиллиты, их переслаивание, линзы гравелитов); б – журавлевская свита (алевроаргиллиты, алевролиты, песчаники); 3 – средне-позднеюрские терригенные отложения Самаркинского террейна: а – самаркинская свита (алевролиты с олистолитами), б – тудовакская свита (кремнисто-глинистые сланцы); 4 – богопольская свита: туфы, туфолавы, туфопесчаники, туффиры, игнимбриты риолитов, реже дациты и лавы риолитов; 5 – богопольский комплекс: дайки риолитов, риодактов; 6 – дорофеевская свита, верхняя подсвита: андезиты, андезибазальты и их туфы с прослойями туфоалевролитов и туфов риолитов; маастрихтский вулканический комплекс: дайки андезитов, андезибазальтов; 7 – дорофеевский комплекс: дайки андезитов, андезибазальтов; 8, 9 – татибинский комплекс (8 – вторая фаза: граниты до умеренно щелочных лейкогранитов, 9 – первая фаза: монцодиориты, монцогаббро-диориты); 10 – тектонические нарушения: а – установленные, б – предполагаемые, в – перекрытие аллювием, г – выделенные по дешифрированию аэроснимков; 11 – геологические границы; 12, 13 – контуры лицензионной площади Малиновского и Намовского месторождений; 14 – Центральный Сихотэ-Алинский разлом; 15 – рудные зоны. На врезке – фрагмент схемы террейнов Сихотэ-Алинского орогенного пояса и прилегающих территорий, по данным [8, 9]: 1 – Ханкайско-Буреинский кристаллический массив и его обрамление; 2 – Самаркинская аккреционная призма; 3 – Прибрежный вулканический пояс; 4 – Журавлевский турбидитовый бассейн – юг и Таухинская аккреционная призма – север; 5 – золоторудные месторождения и рудопроявления (1 – Малиновское, 2 – Намовское)

Золоторудная минерализация Малиновского месторождения локализована как в сводовой, так и в периферической части интрузивного купольного поднятия, сложенного габбромонцонитами, габбромонцодиоритами и монцонитами [2–4, 6, 7]. Рудные тела представлены линейными штокверковыми зонами и отдельными жилами сульфид-кварцевого, сульфид-карбонат-кварцевого и сульфидного составов, протяженностью 60–265 м при мощности от 0,1 до 7,5 м. Их форма извилистая и часто невыдержанная по мощности. Простирание преимущественно субмеридиональное и северо-восточное с крутыми углами падения на восток, в отдельных случаях на запад [2–4]. Рудные тела сопровождаются зонами разнообразных окологильных метасоматических изменений пород – грейзенизацией, хлоритизацией, карбонатизацией, турмалинизацией, сульфидизацией, а местами аргиллизацией.

Рудные жилы и прожилки сложены преимущественно жильными минералами (кварц, карбонат, турмалин и хлорит) и сульфидами (табл. 1). Сульфидная минерализация представлена халькопиритом, пиритом, арсенопиритом, пирротином, сфалеритом, галенитом, молибденитом, висмутином. Реже встречаются сульфосоли (тетраэдрит, кобеллит, Sb-козалит, буронит и лиллианит-густавит); самородный висмут, сульфиды висмута (висмутин, икунолит); сульфотеллуриды (группа жозеита) и теллуриды (хедлеййт) висмута; интерметаллиды золота (мальдонит); антимонид золота (ауростибит), самородное золото, вольфрамат кальция (шеелит) и плавиковый шпат [2–4].

Таблица 1
Краткая геологическая характеристика Малиновского месторождения

Важнейшие признаки	Малиновское месторождение
Орогенный пояс	Сихотэ-Алинский
Террейн	Журавлевско-Амурский
Формационный тип	Золотосульфидно-кварцевый
Вмещающие породы	Монцогаббродиориты, монцодиориты, алевролиты
Возраст оруденения	102,3±1,8 до 106,6±1,7 млн лет (ранний мел, альб) [6], возраст продуктивной рудной минерализации – от 96 до 102 млн лет [3]
Морфология рудных тел	Линейные штокверки
Текстуры руд	Прожилковая, прожилково-вкрапленная, массивная
Жильные минералы	Кварц, карбонаты, хлорит и турмалин, реже шеелит
Рудные минералы	Сульфиды и сульфоарсениды (халькопирит, пирит, арсенопирит, глаукодот, пирротин, сфалерит и галенит, молибденит)
	Висмутовые минералы: сульфотеллуриды (группа жозеита) теллуриды и самородные формы (хедлеййт, самородный висмут)
	Сульфиды: (икунолит, висмутин)
	Сульфосоли: сульфоантимонит меди (тетраэдрит), сложные Pb–Bi–Sb-соединения (кобеллит, Sb-козалит), буронит, лиллианит-густавит
	Интерметаллиды (мальдонит); антимониды (ауростибит)
Морфология зерен самородного золота	Прочие минералы: молибденит, самородное золото
	Кристаллические формы (изометричные, удлиненные), интерстиционные выделения
Проба золота	Преобладает 750–775‰ и 825–850‰, редко 620 и 960‰

Примечание. Данные по Малиновскому месторождению из работы [10] по материалам [2–4, 6].

Самородное золото представлено кристаллическими формами (изометричные, удлиненные, интерстиционные). По размеру в основном преобладает мелкое, очень мелкое и тонко-дисперсное самородное золото. Оно образует как самостоятельные выделения в арсенопирите или халькопирите, так и сростки с висмутовыми минералами. Пробность золота варьирует в достаточно широких пределах – от 620 до 960%. Преобладает 750–775% и 825–850%, редко 620 и 960% [2, 3].

Материалы и методы исследования

Основой исследования текстурно-структурных особенностей руд послужили образцы, полученные при проведении полевых работ, включающих в себя маршрутные наблюдения, документацию канав и керна разведочных скважин с отбором образцов в пределах Малиновского месторождения.

Исследования полированных шлифов в отраженном свете выполнены при помощи бинокулярного микроскопа Nikon E600 POL Optical Microscope for Geological Studies, Jeol (Япония) в комплекте с цифровой телекамерой.

Определение химического состава рудных минералов выполнено в лаборатории рентгеновских методов Аналитического центра ДВГИ ДВО РАН на рентгеноспектральном микронализаторе GEOL JXA-8100.

Исследования особенностей внутреннего строения и состава минералов проведены на двухлучевом сканирующем электронном микроскопе Tescan Lyra 3 XMN + EDS AZtec X-Max 80 Standart в лаборатории микро- и наноисследований ДВГИ ДВО РАН и на настольном растровом электронном микроскопе JCM-6000 в молодежной лаборатории (лаборатория общих и синхротронных методов прикладной петрологии, минералогии и синтеза новых материалов на основе природоподобных технологий) ДВГИ ДВО РАН.

Результаты исследования

Текстуры руд. В пределах месторождения Малиновское широко распространены руды с прожилковой и вкрапленной текстурами, иногда с массивной и гнейсовидно-полосчатой, редко встречаются руды с пятнистой, полосчатой, брекчевой, брекчевидной и друзовой текстурами.

Массивная текстура встречается в сплошных рудах, слагающих пластообразные маломощные тела с линзовидными раздувами (рис. 2, *a*, *δ*). Описываемая текстура характеризуется сплошным расположением сульфидной (пирротин-халькопиритовой, пиритовой, арсенопиритовой) массы, иногда в ней наблюдаются зерна кварца и более поздние тонкие просечки сульфид-карбонатного, хлоритового, реже лимонитового составов, рассекающие жилу.

Вкрапленная текстура характеризуется наличием рассеянных зерен рудных минералов и их агрегатов в нерудной массе, слагающей рудные тела жил и прожилков, а также в метасоматически измененных породах (см. рис. 2, *ε*). Руды с описываемой текстурой чаще всего имеют пиритовый и арсенопиритовый состав. В жилах и призальбандовых частях рудных тел наблюдается неравномерное распределение вкрапленников рудных минералов, что приводит к появлению гнездообразной и пятнистой текстур (см. рис. 2, *ε*).

Полосчатая и гнейсовидно-полосчатая текстуры характерны для рудных жил и прожилков. Они представлены чередованием полосок различного минерального состава и наличием линзовидных и полосчатых минеральных агрегатов удлиненного облика, взаимно перекрывающихся друг в друга. Такой текстурный рисунок характерен для халькопирит-пирротиновой массы, реже пиритовой (см. рис. 2, *α*, *б*).

На месторождении широко распространены прожилковая и прожилкообразные текстуры. Прожилковая (см. рис. 2, *г*) характерна для рудных и нерудных прожилков, они имеют четкие границы с вмещающими породами, их мощность варьируется от первых долей миллиметра до 10 см, часто данная текстура тяготеет к зальбандам. Для нерудных текстур характерно присутствие маломощных просечек и прожилков кварцевого, кварц-карбонатного, хлорит-карбонатного, сульфид-карбонатного, хлоритового и карбонатного состава во вмещающих породах. Они имеют беспорядочно ориентированный (ветвящийся, нитеобразный) вид, часто рассекают

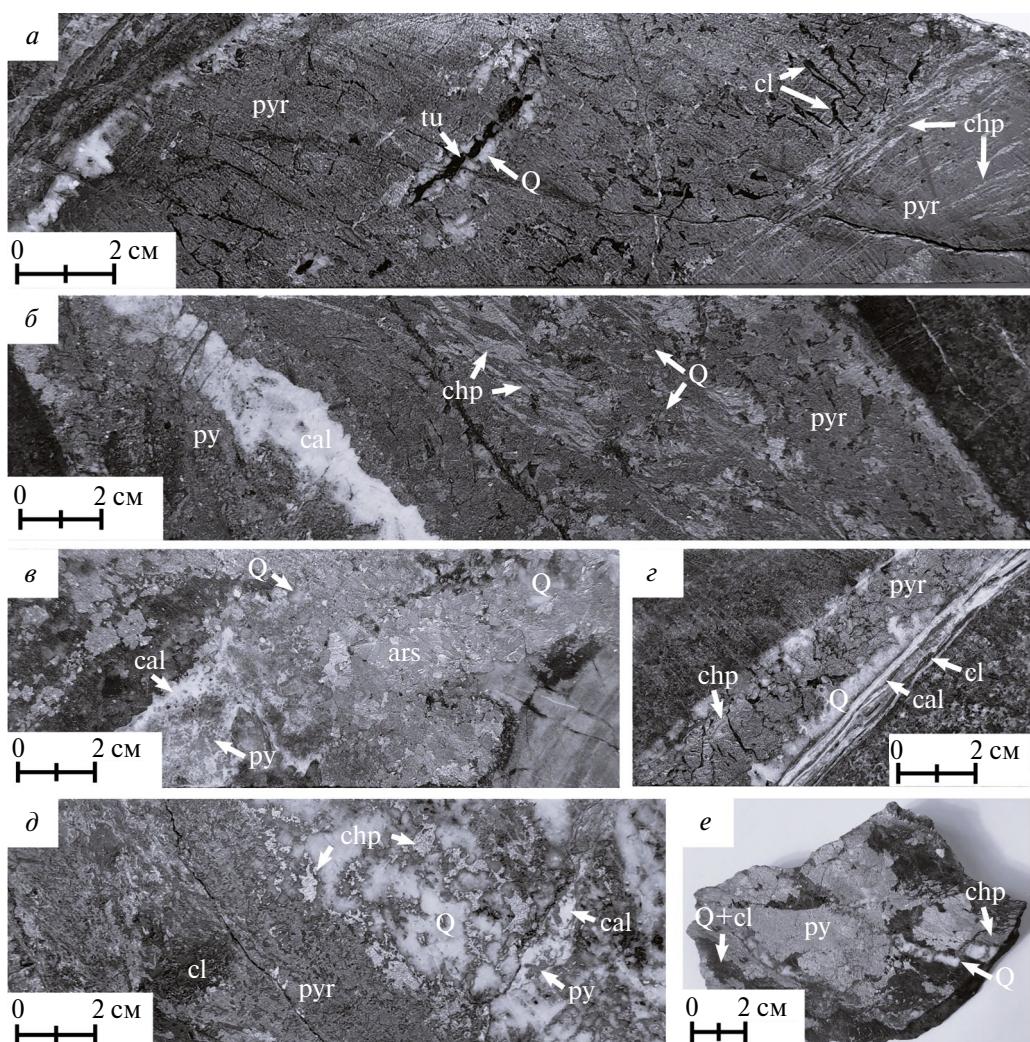


Рис. 2. Текстуры руд Малиновского месторождения: *а* – фрагмент халькопирит-пирротиновой жилы с редкими вкрапленниками кварца, линзочками турмалин-кварцевого состава и хлоритовыми просечками, массивная и полосчатая текстуры; *б* – карбонат-кварц-сульфидная жила, чередование полосок и линзочек пирротина и халькопирита, гнейсовидно-полосчатая и прожилковая текстуры; *в* – фрагмент кварц-сульфидной жилы в пересечении с пирит-карбонатным прожилком, вкрапленная и пятнистая текстуры; *г* – кварц-сульфидный прожилок с тонкими хлорит-карбонатными просечками в призальбандовой части, прожилковая и полосчатая текстуры; *д* – кварц-сульфидная жила с неоднородным составом: к левой части тяготеет преимущественно сульфидная пирротин-халькопиритовая масса с гнездами хлорита и редкими вкрапленниками кварца, к правой – кварцевая с вкрапленниками сульфидов, массивная и прожилково-вкрапленная текстуры; *е* – угловатые обломки пиритовой и пирит-халькопиритовой, сцепментированные хлорит-кварцевым жильным материалом, брекчиевидная текстура. Сокращения: *ars* – арсенопирит, *cal* – карбонаты, *chp* – халькопирит, *cl* – хлорит, *py* – пирит, *pyr* – пирротин, *tu* – турмалин, *Q* – кварц

щий рудные жилы и прожилки, и направленный облик. Для рудных прожилков характерна неравномерная вкрапленность рудных минералов с сокристаллизационной кварцевой массой. С появлением более мощных жил развиваются прожилкообразные текстуры. Для них характерно метасоматическое замещение вмещающих пород вдоль зальбандов жильными минералами, что приводит к потере четких границ и появлению постепенных переходов.

На месторождении также распространены катахластические текстуры, представленные брекчевой и брекчевидной разновидностями. Они установлены в зонах тектонических разломов, реже сопровождают рудные жилы в зальбандовых частях. Обломочный материал брекчий представлен раздробленными вмещающими породами или фрагментами сульфид-кварцевых жил размером от 0,5 до 15 см. Обломки сцементированы жильно-прожилковым материалом хлорит-карбонат-кварцевого состава, сопровождаются вкрапленной минерализацией рудных минералов. Выше по разрезу жилы и прожилки также подвергнуты тектоническим нарушениям и коррозии, что приводит к приобретению брекчевидной текстуры руд (см. рис. 2, *e*).

Редки друзовые текстуры. Они встречаются в маломощных жилах и прожилках и представлены мелкими, реже крупными идиоморфными кристаллами кварца и флюорита, покрытыми окислами железа.

Наряду с охарактеризованными выше текстурами часто отмечаются их комбинации, например прожилково-вкрапленная (см. рис. 2, *d*), прожилково-брекчевая, прожилково-полосчатая и др.

Структуры руд. Характерной особенностью Малиновского месторождения является разнообразие структур руд, что обусловлено совокупностью геодинамической обстановки и особенностей рудообразующих флюидов. При микроскопическом изучении полированных шлифов выделены следующие группы структур: зернистые, коррозионные, метазернистые, кристаллобластические и катахластические.

В группу зернистых входят установленные аллотриоморфно- и гипидиоморфнозернистые структуры. Преобладают аллотриоморфнозернистые структуры (рис. 3, *b*), они часто сложены сплошной пирротин-халькопиритовой массой в кварце, также наблюдаются зернистые агрегаты того же состава, выполняющие интерстиции в жильных минералах. Реже эта структура отмечается для арсенопирита и вкрапленников золотин. Гипидиоморфнозернистая структура встречается менее часто (см. рис. 3, *a*), она характерна для отдельных идиоморфных кристаллов, заключенных в аллотриморфную массу жильных или рудных минералов, таких как пирит, галенит, блеклая руда.

Группу коррозионных представляют скелетная структура и реакционно-каемочная микротекстура. Скелетная структура встречается редко. Она характерна для замещения халькопирита скородитом (см. рис. 3, *d*). В рудах, находящихся в зоне окисления, образуются реакционно-каемочные микротекстуры (см. рис. 3, *e*). Они представлены ковеллином, замещающим халькопирит по границам минералов.

Среди группы метазернистых можно выделить гипидиоморфнometазернистые структуры (см. рис. 3, *c*). Они представлены идиоморфными и гипидиоморфными кристаллами пирита, реже в них можно наблюдать ситообразное строение. Такие метакристаллы образуют прожилки и вкрапления как в рудных минералах, так и в карбонатном, кварц-карбонатном субстрате. Также можно встретить метакристаллы арсенопирита, которые приурочены к микротрецинам, они наблюдаются в ассоциации с висмутовыми минералами и золотом.

Из группы кристаллобластических установлены структуры распада твердых растворов, к которым относятся эмульсионная, ориентированно-эмульсионная, звездчатая, каплевидная, пламеневидная.

Эмульсионная и ориентированно-эмульсионная структуры представлены окружными частицами сфалерита в халькопирите и халькопирита в сфалерите (рис. 4, *a*). Для кристаллов сфалерита часто отмечается ориентированное расположение эмульсий халькопирита по кристаллографическим осям и по зональности и увеличение их количества к краям минерала. Звездчатая структура встречается редко и представлена мелкими звездчатыми выделениями сфалерита в халькопирите (см. рис. 4, *b*). Отмечены единичные случаи звездочек и эмульсий сфалерита в пирите. Размер таких включений очень мелкий, не превышает 1–2 мкм. Каплевидная структура характерна для более крупных выделений халькопирита в сфалерите, также отмечены каплевидные включения самородного золота и мальдонита в дананите размером до 3 мкм (см. рис. 4, *c*). Пламеневидная структура свойственна для минералов золотовисмутовой ассоциации, которая часто встречается в арсенопирите, реже кварце и халькопирите (см. рис. 4, *c*).

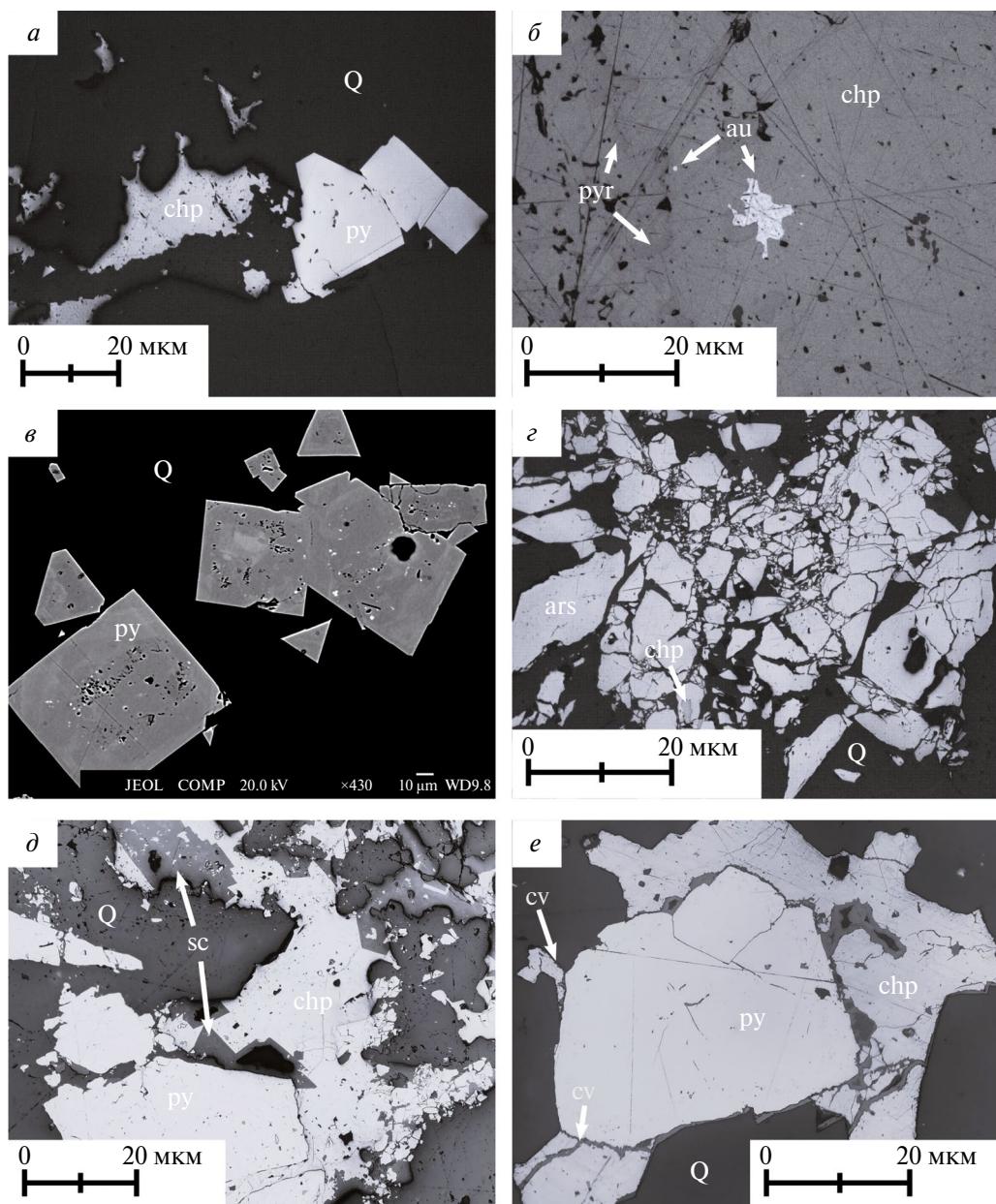


Рис. 3. Структуры руд Малиновского месторождения: *а* – идиоморфные кристаллы пирита в срастании с аллотриоморфным халькопиритом в кварце, гипидиоморфнозернистая структура; *б* – аллотриоморфное выделение золота в халькопирите, аллотриоморфнозернистая структура; *в* – метакристаллы пирита со слабо выраженным зональным и секториальным строением, с неравномерным распределением включений галенита, гипидиоморфнозернистая структура; *г* – агрегат арсенопирита, раздробленного и скементированного кварцем, порфирокластическая структура; *д* – замещение халькопирита скородитом, скелетная коррозионная структура; *е* – замещение халькопирита ковеллином по трещинам и по границам минерала, реакционно-каемочная структура (микротекстура). Сокращения: au – золото, ars – арсенопирит, chp – халькопирит, cv – ковеллин, py – пирит, руг – пирротин, Q – кварц, sc – скородит

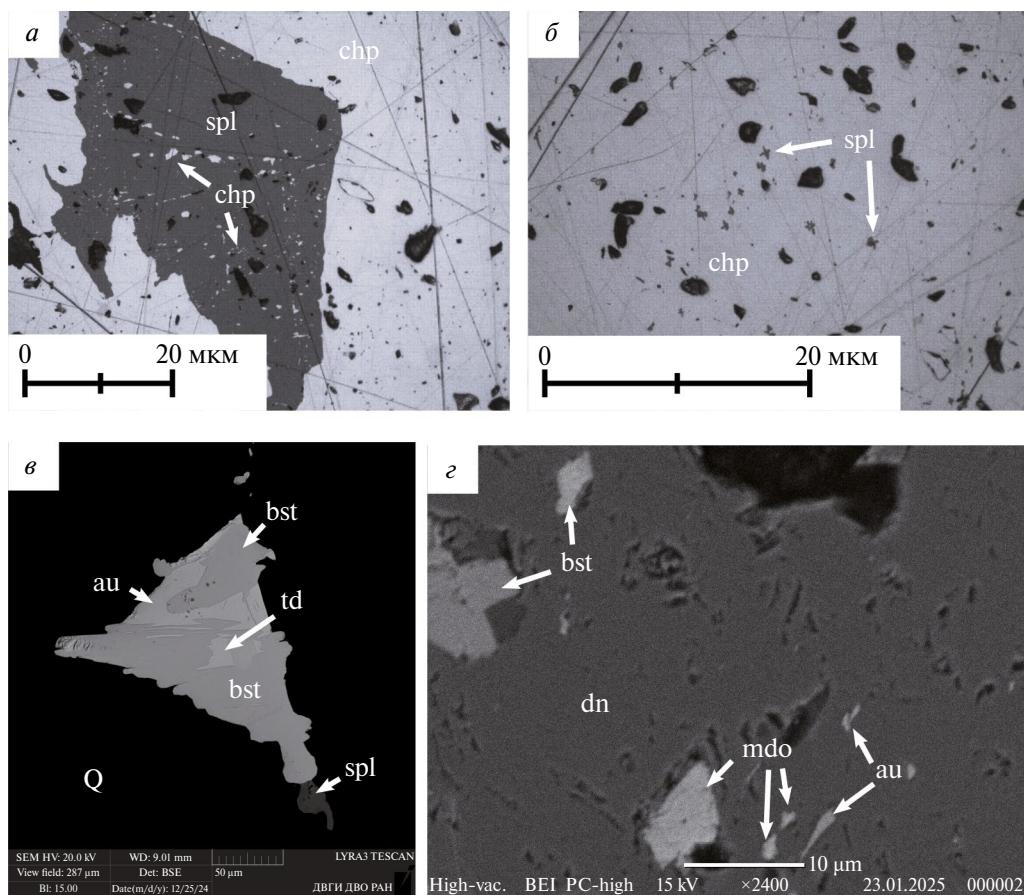


Рис. 4. Структуры распада твердых растворов: *а* – эмульсионная вкрапленность халькопирита в сфалерите; *б* – звездчатые и эмульсионные выделения сфалерита в халькопирите; *в* – пламеневидное срастание золота, висмутина и тетрадимита в кварце; *г* – каплевидные выделения мальдонита и самородного золота в дананите. Сокращения: au – золото, bst – висмутин, chp – халькопирит, dn – дананит, mdo – мальдонит, spl – сфалерит, td – тетрадимит, Q – кварц

Катастические структуры наблюдаются главным образом у хрупких рудных и жильных минералов, наиболее отчетливо отмечаются у зерен арсенопирита и пирита. По трещинам дробления можно отметить замещение, например, арсенопирит замещается более поздним халькопиритом.

Обсуждение результатов

Для руд Малиновского месторождения установлены разнообразные морфогенетические группы и морфологические виды текстур и структур.

На основании исследований выявлена связь между морфологией структур и минеральным составом руд Малиновского месторождения (табл. 2).

Как отмечено, преобладают прожилково-вкрапленные, прожилковые и массивные текстуры (см. табл. 2), которые свидетельствуют о заполнении трещин и пустот гидротермальными растворами, для массивных – концентрированными растворами.

Наличие полосчатых и гнейсовидно-полосчатых текстур, характеризующихся чередованием полос и линзочек различного минерального состава, подчеркивает процессы дифференциации, перекристаллизации и ориентированного роста минералов под воздействием высоких температур и давлений.

Таблица 2

Текстуры руд Малиновского месторождения и слагающие их минералы

Морфогенетические группы	Морфологические виды	Типовые минералы	
		Рудные	Жильные
Массивные	Массивная	Арсенопирит, пирит, пирротин, халькопирит	Кварц
Пятнистые	Вкрапленная	Арсенопирит, данаит, пирит	Кварц
	Пятнистая	Арсенопирит, данаит, пирит	Кварц
Удлиненные	Полосчатая	Пирротин, халькопирит, реже пирит	Кварц, карбонаты, хлорит, турмалин
	Гнейсовидно-полосчатая	Пирротин, халькопирит	—
	Прожилковая	Пирротин, халькопирит, пирит, арсенопирит	Кварц, карбонаты, хлорит, турмалин
	Прожилкообразная	Пирротин, халькопирит, пирит, арсенопирит	Кварц, карбонаты, хлорит
Друзовые	Друзовая	—	Кварц, флюорит
Катахластические	Брекчневая	Пирит, реже арсенопирит	Кварц, карбонаты, хлорит, турмалин
	Брекчевидная	Пирит, халькопирит, арсенопирит	Кварц, карбонаты, хлорит

Выделенные нами брекчневая и брекчевидная текстуры, относящиеся к группе катахластических, указывают на проявление разнонаправленных тектонических напряжений, при которых катализу подверглись ранее сформированные рудные тела и создавались благоприятные условия для проникновения рудоносных растворов.

Редкие друзовые текстуры, представленные прожилками, выполненнымными идиоморфными кристаллами кварца и флюорита, свидетельствуют о более поздних стадиях гидротермальной активности.

Структуры руд Малиновского месторождения, выявленные при микроскопическом изучении полированных шлифов, представлены в табл. 3.

Зернистые структуры указывают на одновременные или близко одновременные условия кристаллизации минералов на начальной стадии рудообразования из гидротермального раствора. Аллотриоморфнозернистые структуры формируются при интенсивной кристаллизации в высокотемпературных условиях, гипидиоморфнозернистые структуры – при уменьшении скорости роста кристаллов, что может быть связано с изменением состава флюидов или температуры.

Коррозионные структуры подчеркивают влияние гидротермальных растворов. Вторичные изменения характеризуются воздействием более поздних флюидов на ранние минералы, что привело к их частичному растворению или замещению. Реакционно-каемочные микротекстуры, характерные для зоны окисления, также указывают на влияние поверхностных процессов на преобразование руд.

Метазернистые структуры, представленные гипидиоморфнотазернистыми кристаллами пирита и арсенопирита, отражают процессы перекристаллизации и метасоматоза. Отмечено, что для метакристаллов характерна ассоциация с золотовисмутовой минерализацией, что подчеркивает роль флюидов в транспортировке и отложении рудного вещества.

Таблица 3
Структуры руд Малиновского месторождения и слагающие их минералы

Морфогенетические группы	Морфологические виды	Типовые минералы	
		Жильные	Рудные
Зернистые	Аллотриоморфнозернистая	Кварц	Пирротин, халькопирит, арсенопирит, золото
	Гипидиоморфнозернистая	Кварц, карбонаты	Пирит, пирротин, галенит, блеклая руда
Коррозионные	Структура разъедания	Кварц	Арсенопирит, данаит, халькопирит, висмутин
	Реакционно-каемочная микротекстура	—	Халькопирит, ковеллин
Метазернистые	Гипидиоморфнометазернистая	Кварц	Арсенопирит, пирит, Bi–Sbсульфосоли
Кристаллобластические (распада твердых растворов)	Эмульсионная	—	Халькопирит, сфалерит, редко пирит
	Ориентированно-эмульсионная	—	Халькопирит, сфалерит, редко пирит
	Звездчатая	—	Сфалерит
	Каплевидная	—	Халькопирит, золото, мальдонит
	Пламеневидная	—	Золото, висмутин, тетрадимит
Катахластические	Порфирокластическая	Кварц, карбонаты	Арсенопирит, пирит

Структуры распада твердых растворов, образующиеся при изменении температурного режима, служат геологическими термометрами. В процессе перекристаллизации они распадаются на более простые химические соединения. Так, эмульсионные, ориентированно-эмульсионные, звездчатые, каплевидные структуры сфалерита в халькопирите и халькопирита в сфалерите формируются при температурах от 350 до 500 °С. Каплевидные выделения самородного золота и висмута, мальдонита, установленные в арсенопирите, являются эвтектической ассоциацией, образовавшейся при 241 °С в системе Au–Bi. Как известно [11–16], устойчивость мальдонита сохраняется в температурном диапазоне 371–116 °С. Исследования флюидных включений в кварце Малиновского месторождения показали, что образование продуктивных жил происходило в среднетемпературных условиях (275–371 °С) [17]. Поэтому, учитывая текстурно-структурные особенности, минеральный состав, флюидные включения, можно предположить, что формирование Малиновского месторождения проходило в пределах от 275 до 500 °С. Возникновение пламеневидных структур связано с быстрым изменением физико-химических параметров.

Катахластические структуры, часто наблюдаемые в разновременных кристаллах и агрегатах арсенопирита и пирита, трещины дробления и замещение арсенопирита халькопиритом подчеркивают длительность тектонических деформаций, которые сопровождали весь период рудообразования.

Анализ текстур и структур рудных образований играет ключевую роль в оценке технологических свойств руд. Данные характеристики определяют пространственное распределение полезных компонентов, их взаимосвязь с нерудными минералами, а также особенности раскрытия минеральных зерен при дроблении, что существенно влияет на эффективность извлечения ценных металлов.

Среди выделенных текстур и структур руд наиболее благоприятными являются массивные текстуры (пирротин-халькопиритовые, пиритовые), характеризующиеся высокой концентрацией сульфидов, что способствует эффективной флотации и гравитационному обогащению; прожилково-вкрапленные текстуры с равномерным распределением рудных минералов в кварцевой массе, обеспечивающие хорошее раскрытие зерен при дроблении, а также аллотриоморфные зернистые структуры, где крупные зерна сульфидов (пирит, халькопирит) легко отделяются от жильных минералов.

К неблагоприятным для обогащения текстурам и структурам руд относятся катаакластические (брекчиевидные) текстуры, требующие тонкого измельчения из-за сильного дробления минералов, что увеличивает энергозатраты и снижает выход концентратов; тонковкрапленные структуры с размерами зерен менее 10 мкм, затрудняющие извлечение даже при тонком помоле, а также реакционно-каемочные микротекстуры (например, замещение халькопирита ковеллином), ухудшающие флотационные свойства минералов вследствие изменения их поверхностных характеристик [1].

При переработке руд Малиновского месторождения ключевыми вредными примесями являются три группы минералов: мышьяксодержащие (арсенопирит) создают токсикологическую опасность и требуют специальной очистки; сурьмяные минералы (тетраэдрит, буронит) и сульфосоли висмута ухудшают качество концентратов из-за сложных срастаний; глинистые (хлорит, карбонаты) и окисленные минералы (лимонит, ковеллин) осложняют флотацию, образуя шламы и изменяя поверхностные свойства [18].

Заключение

Проведенные исследования позволили установить, что наиболее распространеными текстурами руд являются прожилково-вкрапленная, массивная и вкрапленная, среди выделенных видов структур – аллотриоморфно- и гипидиоморфнозернистая, гипидиоморфногематозернистая и порфиросластиическая. Стоит отметить, что вышеописанные текстуры и структуры руд очень редко встречаются в изолированном, или «чистом», виде. Довольно часто они плавно переходят одна в другую, образуя комбинированные текстуры, такие как прожилково-вкрапленная, прожилково-брекчиевая, прожилково-полосчатая и др. При изучении структур также выявлены различные сочетания, например, в группе зернистых наблюдается совместное присутствие аллотриоморфнозернистой и гипидиоморфнозернистой структур, сочетание эмульсионной, звездчатой и каплевидной структур распада твердого раствора. Часто устанавливается наложение катаакластических структур на другие, более ранние, например порфиросластиическая структура в метакристалле арсенопирита.

Комплексное изучение текстурно-структурных особенностей руд Малиновского месторождения свидетельствует о сложном процессе их формирования. Преобладание руд с прожилково-вкрапленной и массивной текстурами отражает кристаллизацию минеральных ассоциаций из насыщенных гидротермальных растворов, тогда как развитие в них зернистых и метасоматических структур указывает на последующую перекристаллизацию в изменяющихся физико-химических условиях. Широкое распространение катаакластических текстур и структур руд связано с интенсивными тектоническими деформациями, которые создавали благоприятные условия для миграции поздних рудоносных флюидов. Проведенные исследования подтверждают, что рудообразование на Малиновском месторождении протекало в условиях гидротермально-метасоматического процесса, осложненного интенсивными тектоническими деформациями.

Руды Малиновского месторождения перспективны для обогащения, особенно участки с массивными и прожилково-вкрапленными текстурами, где преобладают крупнозернистые сульфиды (халькопирит, пирит) и свободное золото. Однако наличие катаакластических и тонковкрапленных структур требует комбинированных методов переработки (флотация + цианирование). Вредные примеси (мышьяк, сурьма, глинистые минералы) могут увеличить затраты на очистку. Для эффективной разработки месторождения рекомендуется дифференцированный подход к переработке руд с различными текстурно-структурными особенностями и обязательный контроль содержания вредных примесей на всех стадиях технологического процесса.

СПИСОК ИСТОЧНИКОВ

1. Исаенко М.П. Определитель текстур и структур руд. М.: Недра, 1983. 261 с.
2. Гвоздев В.И., Доброшевский К.Н., Вах А.С., Горячев Н.А., Степанов В.А., Федосеев Д.Г. Малиновское месторождение – новый тип золоторудной минерализации в Приморском крае, Россия (геология, минералогия, генезис) // Тихоокеанская геология. 2016. Т. 35 (1). С. 37–53. <https://doi.org/10.30911/0207-4028-2021-40-3-28-40>
3. Доброшевский К.Н., Гвоздев В.И., Шлыков С.А., Степанов В.А., Федосеев Д.Г. Вещественный состав и геохимические особенности руд Малиновского золоторудного месторождения (Приморский край) // Тихоокеанская геология. 2017. Т. 36 (5). С. 59–74.
4. Доброшевский К.Н., Горячев Н.А. О возрасте и геодинамических факторах формирования золотого оруденения Малиновского месторождения (Сихотэ-Алинская золотоносная провинция, Россия) // Тихоокеанская геология. 2021. Т. 40 (3). С. 28–40. <https://doi.org/10.30911/0207-4028-2021-40-3-28-40>
5. Grebennikov A.V., Kasatkin S.A. Paleocene A-type igneous suites in the Sikhote-Alin (the East Asian continental margin): Petrological, geochronological, isotopic, and geodynamic constraints // Geoscience Frontiers. 2023. Vol. 14 (6). 101673. <https://doi.org/10.1016/j.gsf.2023.101673>
6. Степанов В.А., Бельченко Е.Л., Доброшевский К.Н., Гвоздев В.И. Малиновское золоторудное месторождение, Приморский край // Руды и металлы. 2013. № 3. С. 26–34.
7. Сахно В.Г., Степанов В.А., Гвоздев В.И., Доброшевский К.Н. Малиновская золоторудная магматическая система Центрального Сихотэ-Алиня: геохронология, петрогоеохимический состав и изотопная характеристика магматических комплексов (Приморье, Россия) // Докл. РАН. 2013. Т. 452 (1). С. 61–69. <https://doi.org/10.7868/S0869565213260174>
8. Голозубов В.В. Тектоника юрских и нижнемеловых комплексов северо-западного обрамления Тихого океана. Владивосток: Дальнаука, 2006. 239 с.
9. Геодинамика, магматизм и металлогения Востока России / под ред. А.И. Ханчука. Владивосток: Дальнаука, 2006. Кн. 1. 572 с.
10. Гребенникова А.А. Геологическая позиция и особенности состава, строения и генезиса золоторудных (с висмутовой минерализацией) месторождений Сихотэ-Алиня // Вестник ДВО РАН. 2024. № 5. С. 62–82. <https://doi.org/10.31857/S0869769824050056>
11. Некрасов И.Я. Экспериментальное изучение условий образования интерметаллидов серебра и золота // Минералогический журнал. 1985. Т. 7 (2). С. 61–71.
12. Некрасов И.Я. Геохимия, минералогия и генезис золоторудных месторождений. М.: Наука, 1991. 302 с.
13. Гамянин Г.Н., Некрасов И.Я., Самусиков В.П. Мальдонит из золоторудных проявлений Восточной Якутии // Минералогический журнал. 1986. Т. 8 (3). С. 65–71.
14. Tooth B., Brugger J., Ciobanu C.L., Liu W. Modeling of gold scavenging by bismuth melts coexisting with hydrothermal fluids // Geology. 2008. Vol. 36. P. 815–818.
15. Tooth B., Ciobanu C.L., Green L., O'Neill B., Brugger J. Bi-melt formation and gold scavenging from hydrothermal fluids: An experimental study // Geochim. Cosmochim. Acta. 2011. Vol. 75. P. 5423–5443.
16. Tooth B., Etschmann B., Pokrovski G.S., Testemale D., Hazemann J., Grundler P.V., Brugger J. Bismuth speciation in hydrothermal fluids: an X-ray absorption spectroscopy and solubility study // Geochim. Cosmochim. Acta. 2013. Vol. 101. P. 156–172.
17. Бахтина В.Н., Гребенникова А.А., Доброшевский К.Н., Федосеев Д.Г., Горячев Н.А. Физико-химические условия формирования рудной минерализации Малиновского месторождения (Южный Сихотэ-Алинь) // III Молодежная научная конференция-школа с международным участием «Геология на окраине континента». Владивосток, 2024. С. 119–122.
18. Абрамов А.А. Переработка, обогащение и комплексное использование твердых полезных ископаемых. Т. 1. Обогатительные процессы и аппараты. М.: Изд-во Московского государственного горного университета, 2004. 470 с.

REFERENCES

1. Isaenko M.P. Opredelitel' tekstur i struktur rud. Moscow: Nedra; 1983. 261 p. (In Russ.).
2. Gvozdev V.I., Dobroshevskii K.N., Vakh A.S., Goryachev N.A., Stepanov V.A., Fedoseev D.G. Malinovskoe mestorozhdenie – novyi tip zolotorudnoi mineralizatsii v Primorskem krae, Rossiya

(geologiya, mineralogiya, genezis). *Tikhookeanskaya Geologiya*. 2016;35(1):37–53. (In Russ.). <https://doi.org/10.30911/0207-4028-2021-40-3-28-40>

3. Dobroshevskii K.N., Gvozdev V.I., Shlykov S.A., Stepanov V.A., Fedoseev D.G. Veshchestvennyi sostav i geokhimicheskie osobennosti rud Malinovskogo zolotorudnogo mestorozhdeniya (Primorskii krai). *Tikhookeanskaya Geologiya*. 2017;36(5):59–74. (In Russ.).

4. Dobroshevskii K.N., Goryachev N.A. O vozraste i geodinamicheskikh faktorakh formirovaniya zolotogo orudieniya Malinovskogo mestorozhdeniya (Sikhote-Alin'skaya zolotonosnaya provintsiya, Rossiya). *Tikhookeanskaya Geologiya*. 2021;40(3):28–40. (In Russ.). <https://doi.org/10.30911/0207-4028-2021-40-3-28-40>

5. Grebennikov A.V., Kasatkin S.A., Paleocene A-type igneous suites in the Sikhote-Alin (the East Asian continental margin): Petrological, geochronological, isotopic, and geodynamic constraints. *Geoscience Frontiers*. 2023;14(6):101673. <https://doi.org/10.1016/j.gsf.2023.101673>

6. Stepanov V.A., Bel'chenko E.L., Dobroshevskii K.N., Gvozdev V.I. Malinovskoe zolotorudnoe mestorozhdenie, Primorskii krai. *Rudy i Metally*. 2013;(3):26–34. (In Russ.).

7. Sakhno V.G., Stepanov V.A., Gvozdev V.I., Dobroshevskii K.N. Malinovskaya zolotorudnaya magmaticheskaya sistema tsentral'nogo Sikhote-Alinya: geokhronologiya, petrogeokhimicheskii sostav i izotopnaya kharakteristika magmaticheskikh kompleksov (Primor'e, Rossiya). *Dokl. RAN*. 2013;452(1):61–69. (In Russ.). <https://doi.org/10.7868/S0869565213260174>

8. Golozubov V.V. Tektonika yurskikh i nizhnemelovykh kompleksov severo-zapadnogo obramleniya Tikhogo okeana. Vladivostok: Dal'nauka; 2006. 239 p. (In Russ.).

9. Khanchuk A.I. (Ed.). Geodinamika, magmatizm i metallogeniya Vostoka Rossii. Vladivostok: Dal'nauka; 2006. Vol. 1. 572 p. (In Russ.).

10. Grebennikova A.A. Geologicheskaya pozitsiya i osobennosti sostava, stroeniya i genezisa zolotorudnykh (s vismutovoi mineralizatsiei) mestorozhdenii Sikhote-Alinya. *Vestnik of the FEB RAS*. 2024;(5):62–82. (In Russ.). <https://doi.org/10.31857/S0869769824050056>

11. Nekrasov I.Ya. Ehksperimental'noe izuchenie uslovii obrazovaniya intermetallidov serebra i zolota. *Minerologicheskii Zhurnal*. 1985;7(2):61–71. (In Russ.).

12. Nekrasov I.Ya. Geokhimiya, mineralogiya i genezis zolotorudnykh mestorozhdenii. Moscow: Nauka; 1991. 302 p. (In Russ.).

13. Gamyanin G.N., Nekrasov I.Ya., Samusikov V.P. Mal'donit iz zolotorudnykh proyavlenii Vostochnoi Yakutii. *Minerologicheskii Zhurnal*. 1986;8(3):65–71. (In Russ.).

14. Tooth B., Brugger J., Ciobanu C.L., Liu W. Modeling of gold scavenging by bismuth melts coexisting with hydrothermal fluids. *Geology*. 2008;36:815–818.

15. Tooth B., Ciobanu C.L., Green L., O'Neill B., Brugger J. Bi-melt formation and gold scavenging from hydrothermal fluids: An experimental study. *Geochim. Cosmochim. Acta*. 2011;75:5423–5443.

16. Tooth B., Etschmann B., Pokrovski G.S., Testemale D., Hazemann J., Grundler P.V., Brugger J. Bismuth speciation in hydrothermal fluids: an X-ray absorption spectroscopy and solubility study. *Geochim. Cosmochim. Acta*. 2013;101:156–172.

17. Bakhtina V.N., Grebennikova A.A., Dobroshevskii K.N., Fedoseev D.G., Goryachev N.A. Fiziko-khimicheskie usloviya formirovaniya rudnoi mineralizatsii Malinovskogo mestorozhdeniya (Yuzhnyi Sikhote-Alin'). In: III Molodezhnaya nauchnaya konferentsiya-shkola s mezhdunarodnym uchastiem: *Geologiya na okraine kontinenta*. Vladivostok; 2024. P. 119–122. (In Russ.).

18. Abramov A.A. Pererabotka, obogashchenie i kompleksnoe ispol'zovanie tverdykh poleznykh iskopаемых. Vol. 1. Obogatitel'nye protsessy i apparaty. Moscow: Izdatel'stvo Moskovskogo Gosudarstvennogo Gornogo Universiteta; 2004. 470 p. (In Russ.).

Научная статья

УДК 549+553.32+235.47

DOI: 10.7868/S3034530825050027

Новые данные по минералогии марганцевосиликатных пород триасовой кремневой формации Сихотэ-Алиня

Е.В. Перевозникова[✉], В.Т. Казаченко

Елена Валерьевна Перевозникова

кандидат геолого-минералогических наук, старший научный сотрудник

Дальневосточный геологический институт ДВО РАН, Владивосток, Россия

elenavalper@yandex.ru

<https://orcid.org/0000-0003-4805-3833>

Валентин Тимофеевич Казаченко

доктор геолого-минералогических наук, главный научный сотрудник

Дальневосточный геологический институт ДВО РАН, Владивосток, Россия

vkazachenko@mail.ru

<https://orcid.org/0000-0002-5331-499X>

Аннотация. В статье приведены новые данные по минералогии марганцевосиликатных пород – контактово-метаморфизованных аналогов кремнисто-родохрозитовых пород. Особый интерес к этим породам связан с присутствием Au–Ag–Pd–Pt минерализации. Целью исследований являлось получение новых данных о минералах и происхождении малоизученных марганцевосиликатных пород Мокрушинской площади Ольгинского района. В результате получены новые сведения для спессартина, пирофанита, кобальтина и костибита из марганцевосиликатных пород. Выявлена и изучена группа минералов и минеральных разновидностей, относящихся к числу редких в природе: пироксмангит, мanganокуммингтонит, никелин, зиженит, паркерит, – а также ранее неизвестных в Сихотэ-Алине: манганогрюнерит, кобальтпентландит, кобальтсодержащий (богатый Co) пентландит и соединение $PbBi_6(Te,S)_9$. Показано, что парагенезисы марганцевосиликатных пород Сихотэ-Алиня и слагающие их породообразующие минералы различаются по составу в зависимости от площади их распространения. Эти особенности отражают различия в химическом составе протолитов марганцевосиликатных пород, что свидетельствует о значительных региональных вариациях фациальных условий накопления богатых Mn металлоносных осадков. Установлено, что марганцевосиликатные породы сложены разновременными ассоциациями. Наиболее ранние из них с пироксеноидами, спессартином, амфиболами, соединениями Ni и Co, сульфидами Fe, Pb, Zn и Cu образовались при температуре ~500–550 °C в результате контактового метаморфизма при внедрении Владимира гранитоидного массива. Более поздние ассоциации с кварцем, амфиболами, самородным серебром и сульфидами Fe, Sn, Pb, Zn и Cu формировались при температуре ~250–350 °C в результате эпизодической циркуляции подвижной флюидной фазы в зонах повышенной проницаемости на фоне остывания Владимира гранитоидного массива.

Ключевые слова: минералогия, марганцевосиликатные породы, триас, Сихотэ-Алинь

Для цитирования: Перевозникова Е.В., Казаченко В.Т. Новые данные по минералогии марганцево-силикатных пород триасовой кремневой формации Сихотэ-Алиня // Вестн. ДВО РАН. 2025. № 5. С. 20–40. <http://dx.doi.org/10.7868/S3034530825050027>

Благодарности. Авторы выражают благодарность Д.В. Авдееву (ХИАЦ ИТИГ ДВО РАН), Л.С. Боковенко (ХИАЦ ИТИГ ДВО РАН) за определение содержаний редких элементов в марганцево-силикатных породах и к.г.-м.н. А.А. Карабцовой (ДВГИ ДВО РАН), Г.Б. Молчановой (ДВГИ ДВО РАН) за выполнение анализов минералов на рентгеноспектральном микроанализаторе.

Финансирование. Работа выполнена в рамках государственного задания Минобрнауки России для ДВГИ ДВО РАН.

Original article

New data on mineralogy of manganesesilicate rocks of triassic chert formation of the Sikhote-Alin

E.V. Perevoznikova, V.T. Kazachenko

Elena V. Perevoznikova

Candidate of Sciences in Geology and Mineralogy, Senior Researcher
Far East Geological Institute, FEB RAS, Vladivostok, Russia
elenavalper@yandex.ru
<https://orcid.org/0000-0003-4805-3833>

Valentin T. Kazachenko

Doctor of Sciences in Geology and Mineralogy, Chief Researcher
Far East Geological Institute, FEB RAS, Vladivostok, Russia
vkazachenko@mail.ru
<https://orcid.org/0000-0002-5331-499X>

Abstract. The article presents new data about mineralogy of manganesesilicate rocks, contact-metamorphosed analogues of siliceous-rhodochrosite rocks. Of particular interest to these rocks is the presence of Au–Ag–Pd–Pt mineralization. The purpose of the research was to obtain new data on the mineralogy and origin of the little-studied manganesesilicate rocks of the Mokrushinskaya area of the Olginsky district. As a result, new information was obtained for spessartine, pyrophanite, cobaltine, and costibite from manganesesilicate rocks, and a group of minerals and mineral varieties were identified and studied that are rare in nature and previously unknown in Sikhote-Alin (pyroxmangite, manganocummingtonite, manganogrunerite, nickeline, zigenite, cobaltpentlandite, rich in Co pentlandite, parkerite, compound $PbBi_6(Te,S)_9$, native silver and other minerals). It is shown that the parageneses of manganesesilicate rocks of the Sikhote-Alin and their constituent rock-forming minerals differ in composition depending on the area of their distribution. These features reflect differences in the chemical composition of protoliths of manganese silicate rocks, which indicates significant regional variations in the facies conditions of accumulation of Mn-rich metalliferous sediments. It has been established that manganesesilicate rocks are composed of various associations. The earliest ones were formed at the temperature $\sim 500–550$ °C as a result of contact metamorphism during the introduction of the Vladimir granitoid massif. Later associations were formed at the temperature $\sim 250–350$ °C as a result of the episodic circulation of the mobile fluid phase in the zones of increased permeability against the background of cooling of the Vladimirsky massif.

Keywords: mineralogy, manganesesilicate rocks, Triassic, Sikhote-Alin

For citation: Perevoznikova E.V., Kazachenko V.T. New data on mineralogy of manganesesilicate rocks of triassic chert formation of the Sikhote-Alin. *Vestnik of the FEB RAS*. 2025;(5):20–40. (In Russ.). <http://dx.doi.org/10.7868/S3034530825050027>

Acknowledgments. The authors are grateful to D.V. Avdeev (HIAC ITIG FEB RAS) and L.S. Bokovenko (HIAC ITIG FEB RAS) for determining the contents of rare elements in manganesesilicate rocks; Candidate of Sciences in Geology and Mineralogy A.A. Karabtsov (FEGI FEB RAS) and G.B. Molchanova (FEGI FEB RAS) for performing mineral analyses on an X-ray spectral microanalyzer.

Funding. The work was carried out within the framework of the state assignment of the Ministry of Science and Higher Education of the Russian Federation for the Far East Geological Institute, FEB RAS.

Введение

Марганцевосиликатные породы встречаются в триасовой кремневой формации Сихотэ-Алиня, сложенной кремнями, кремневыми аргиллитами, аргиллитами, алевроаргиллитами, известняками и мергелями. Нижняя часть формации (оленек–средний анизий) отличается распространением углеродистых разностей пород [1]. Она перекрыта толщей кремней, в основании которой присутствует горизонт мощностью более 3 м, состоящий из яшм (поздний анизий–ладин), а также, местами, силикатно-магнетитовых руд, кремнисто-родахрозитовых и марганцевосиликатных пород [2].

Марганцевосиликатные породы – контактово-метаморфизованные аналоги кремнисто-родахрозитовых пород, мало изученных в отношении запасов Mn. По содержанию и минеральной форме этого металла они соответствуют рудам карбонатного типа. Особый интерес к марганцевосиликатным породам Сихотэ-Алиня связан с присутствием Au–Ag–Pd–Pt минерализации. Актуальность их изучения определяется также возможностью использования результатов для решения других проблем геологии и металлогении Сихотэ-Алиня.

Цель исследований – получение дополнительных данных по минералогии и происхождению малоизученных марганцевосиликатных пород Мокрушинской площади.

В процессе исследований решались следующие задачи: 1) изучение минерального состава марганцевосиликатных пород; 2) изучение взаимоотношений минералов и выяснение последовательности образования минеральных ассоциаций; 3) характеристика химического состава минералов и выяснение температурных условий образования ассоциаций с помощью геотермометров, базирующихся на минеральных равновесиях.

Методы исследований

Отбор образцов и проб для аналитических исследований производился из коренных выходов марганцевосиликатных пород Мокрушинской площади штупфным способом. Содержания редких элементов определялись в Хабаровском инновационно-аналитическом центре ИТИГ ДВО РАН методом масс-спектрометрии с индуктивно-связанной плазмой на спектрометре ICP-MS Elan DRC II PerkinElmer (США). Использовалось кислотное разложение проб в микроволновом поле.

Диагностика минералов выполнялась под микроскопом и подтверждалась определением составов. Анализы (в анишлифах) выполнены в ДВГИ ДВО РАН на рентгеноспектральном микроанализаторе JXA 8100 с тремя волновыми спектрометрами и энергодисперсионным спектрометром (ЭДС) INCA x-sight при ускоряющем напряжении 20 кВ и токе 1×10^{-8} А. Содержания элементов определялись с помощью ЭДС. Угол отбора излучения составлял 45° , локальность – 1 мкм. Количественный анализ производился по процедуре PhyRoZ (стандартной программе энергодисперсионного анализатора Link ISIS) с применением пользовательского (не заводского) набора эталонов, поставляемого фирмой Agar Scientific. Погрешность (относительное стандартное отклонение) не превышала: 1) при концентрациях элемента от 1 до 5 мас. % – ± 10 отн. %; 2) от 5 до 10 мас. % – ± 5 ; 3) свыше 10 мас. % – ± 2 . Предел обнаружения в зависимости от элемента изменялся от 0,04 до 0,1 мас. %.

Пересчет анализов всех минералов, кроме пирротина, производился по числу атомов катионов (кроме водорода) в теоретических формулах. В случае пирротина пересчет производился по атомному количеству S, принятому за 1 атом в формуле минерала.

Геологическое положение марганцевосиликатных пород в Ольгинском рудном районе

В юго-западной части Ольгинского рудного района (рис. 1) расположена вулканотектоническая депрессия, выполненная средними и кислыми позднемеловыми–палеогеновыми вулканитами. На востоке и северо-востоке района депрессия обрамлена позднемеловыми гранитоидами Владимира массива. В северо-западной части обнажены дислоцированные осадочные породы фундамента Восточно-Сихотэ-Алинского вулканоплутонического пояса, относящиеся к меланжевому комплексу позднеюрской–раннемеловой аккреционной призмы. Они представлены блоками палеозойских (D_3 – C_3) рифогенных известняков, кремнистых и кремнисто-глинистых пород и фрагментами триасовой кремневой формации в позднеюр-

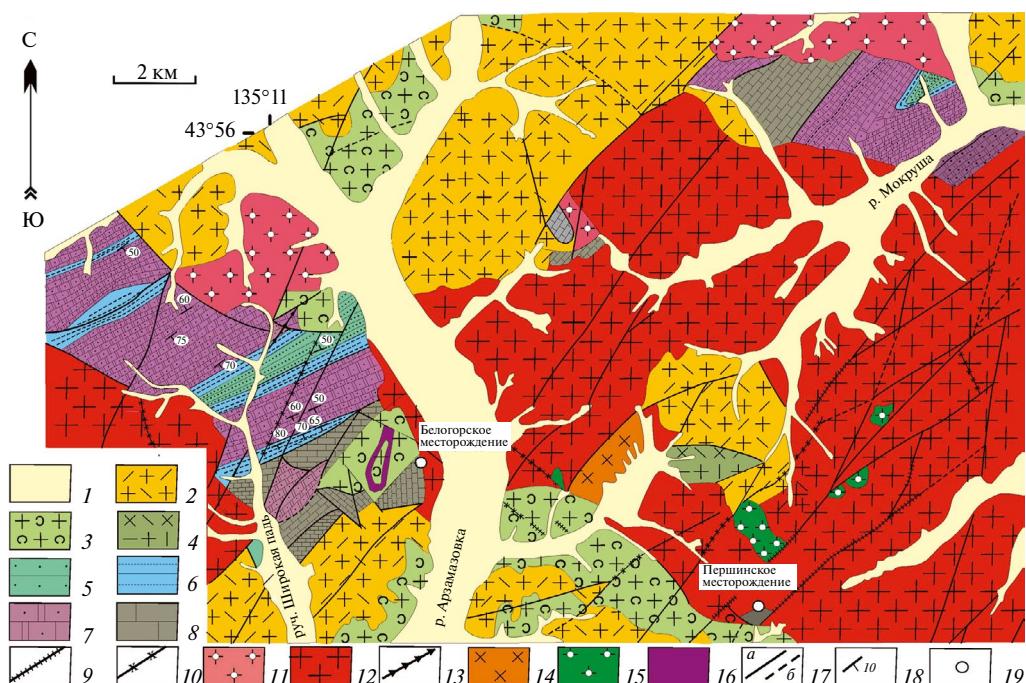


Рис. 1. Схема геологического строения фрагмента Ольгинского рудного района по Ф.И. Ростовскому и др. (1981 г.), с изменениями и дополнениями (Ростовский Ф.И., Мельник В.Г., Лысюк А.Ф. и др. Геологическое строение и полезные ископаемые бассейнов рек Аввакумовки, Ольги и Тимофеевки: отчет Ольгинской партии о результатах геологической съемки и поисков масштаба 1:50 000: В 2 т. Владивосток, 1981; место хранения – Российский федеральный геологический фонд). Условные обозначения: 1 – четвертичные отложения; 2 – палеоцен: богопольский вулканический комплекс – риолиты, риодакиты и их туфы; 3, 4 – поздний мел: 3 – приморский вулканический комплекс (турон–сантон) – туфы и туфопесчаники риолитов, риодакитов, 4 – синанчинская свита (сеноман) – андезиты, андезибазальты и их туфы; 5 – ранний мел (?): песчаниковая толща; 6 – юрская система (J_{2-3}): алевролиты, туфиты, кремнистые породы, кремнисто-глинистые сланцы, песчаники; 7 – триасовая система: терригенно-кремнистая толща (T_{2-3}); 8 – палеозой (D_3 – C_3) – известняки, глинистые сланцы, песчаники; 9–11 – богопольский плутонический комплекс (палеоцен): дайки диоритов, андезитов, базальтов (9); дайки (10) и экструзии (11) риолитов, риодакитов, гранит-порфиров; 12 – граниты Владимира массива (маастрихт–дат); 13–16 – приморский плутонический комплекс (турон–сантон): 13 – дайки риолитов, аплитов и пегматитов, 14–16 – субвулканические интрузии диоритов (14), габбродиоритов (15), дацитов (16); 17 – разломы установленные (a) и предполагаемые (б); 18 – направления и углы падения геологических границ; 19 – магнетитовые месторождения

ско-раннемеловом терригенном матриксе. Породы фундамента Восточно-Сихотэ-Алинского вулканоплутонического пояса слагают разделенные вулканогенными и интрузивными образованиями Широкопаднинскую и Мокрушинскую площади (см. рис. 1).

Геологическая позиция марганцевосиликатных пород детально изучена на примере Широкопаднинской площади. Нижняя часть триасовой кремневой формации сложена глинисто-кремнистой толщей с прослойями углеродистых пород. Ее возраст, как и в других районах Сихотэ-Алиня, отвечает верхам нижнего триаса (оленек) – среднему анизию [1]. Она перекрыта толщей светло-серых кремней. В основании последней присутствует горизонт яшм (поздний анизий–ладин) мощностью более 3 м. Вышележащие кремни относятся к карнию и норию. Кремнисто-родахрозитовые, марганцевосиликатные, силикатно-магнетитовые породы и руды слагают стратифицированные линзообразные и пластовые тела и вместе с яшмами образуют рудоносную пачку или сменяют друг друга по простиранию. На поверхности их выходы маркируют выходы смятого в складки рудоносного горизонта. Некоторые зоны прослежены по простиранию на расстояние до 4,5 км.

Результаты исследований

Протолитами марганцевосиликатных пород являлись богатые Mn биогенные кремнистые илы [3]. В Таухинском террейне контактовый метаморфизм кремней с дисперсным родахрозитом (продуктом диагенеза богатых Mn осадков), связанный с гранитоидными массивами Восточно-Сихотэ-Алинского вулканоплутонического пояса, происходил в позднем мелу–палеогене. Марганцевосиликатные породы ассоциируют с массивами, при кристаллизации которых литостатическое давление на уровне современного эрозионного среза составляло около 1,5 кбар [2]. Они имеют сложные минералогию и химический состав, в том числе и в отношении редких элементов (табл. 1), обусловленные составом протолитов. Породы обладают массивной, пятнистой или полосчатой текстурой, связанной с первичной слоистостью осадков.

Результаты, на которых базируется статья, включают сведения о внутреннем строении, минералогии и ассоциациях пород Мокрушинской площади. Обнаруженные в них минералы относятся в основном к эндогенным и делятся на породообразующие и акцессорные (табл. 2). К породообразующим относятся пироксеноиды, манганокуммингтонит, манганогрюнерит, пирофанит (отнесен условно, так как встречается часто, но в виде рассеянных кристаллов) и кварц. Эти минералы наблюдались в разных комбинациях без признаков реакционных взаимоотношений. Они слагают ранние ассоциации (рис. 2, *a–d*), содержащие редкие рассеянные кристаллы кобальтина, кобальтпентландита, богатой Со разновидности пентландита, никелина, зигенита, паркерита, пирита, галенита, сфалерита и халькопирита. Иногда породы состоят из родонит–спессартиновых (с пирофанитом и кобальтином), местами переходящих в амфибол–родонитовые, и родонитовых полосок (см. рис. 2, *d*). Встречается чередование полосок родонитового, амфибол–спессартинового и спессартин–родонитового составов (см. рис. 2, *e*).

На ранние ассоциации наложены гидротермальные изменения, с которыми связано образование реакционных каемок на контактах амфибала и пироксеноидов (см. рис. 2, *g, d*). Каемки состоят из более мелких выделений амфибала, а также кварца. С этим же процессом связано образование по пироксеноидам (вдоль спайности или границ кристаллов) мельчайших выделений амфибала и (или) кварца, а также мелких рассеянных зерен и сложных срастаний самородного серебра, $PbBi_6(Te,S)_9$, Ag_2S , пирита, пирротина, сфалерита, халькопирита, галенита, станинина и торианита (см. рис. 2, *e, ж*). Наиболее поздней (из эндогенных) является спессартин–амфиболовая ассоциация, наложенная на предыдущую (см. рис. 2, *z*).

Большой интерес вызывают продукты экзогенного изменения марганцевосиликатных пород, так как содержат мельчайшие выделения палладистого золота (так называемого порпецита) и самородного золота без примесей. В анишлифах наблюдались многие сотни частичек этих минералов, приуроченных к зонкам определенного состава натечных агрегатов гидроксидов Mn, выполняющих полости экзогенного выщелачивания пироксеноидов.

Результаты определения химического состава минералов приведены в табл. 3–6.

Таблица 1
Пределы и средние содержания второстепенных элементов
в марганцевосиликатных породах Сихотэ-Алиня, г/т

Элемент	Площадь		Элемент	Площадь	
	Горная	Широкопаднинская		Горная	Широкопаднинская
V	<u>6,88–131,79</u> 49,80	<u>2,06–172,71</u> 52,39	Cd	<u>0,01–4,85</u> 0,32	<u>0,00–20,98</u> 3,47
Cr	<u>0,76–24,48</u> 4,44	<u>0,53–49,09</u> 9,34	In	<u>0,00–0,64</u> 0,05	<u>0,03–21,74</u> 1,67
Co	<u>8,50–109,76</u> 55,98	<u>2,01–221,27</u> 57,31	Sb	<u>0,00–23,64</u> 4,47	<u>1,92–35,84</u> 7,55
Ni	<u>13,65–442,95</u> 127,21	<u>3,19–421,32</u> 92,06	Ta	<u>0,00–1,02</u> 0,10	<u>0,00–1,74</u> 0,24
Cu	<u>0,00–110,62</u> 9,42	<u>0,00–588,21</u> 88,00	W	<u>0,30–21,84</u> 2,22	<u>0,03–44,87</u> 9,42
Zn	<u>0,00–3335,8</u> 232,29	<u>78,97–4628,26</u> 1389,12	Hg	<u>0,00–1,82</u> 0,17	<u>0,00–5,77</u> 1,02
Ge	<u>0,64–9,99</u> 3,71	<u>1,53–5,32</u> 2,73	Tl	<u>0,02–0,15</u> 0,08	<u>0,00–0,32</u> 0,08
As	<u>1,97–242,57</u> 31,79	<u>2,35–402,11</u> 62,65	Pb	<u>0,99–160,54</u> 7,81	<u>6,28–11 273,40</u> 943,27
Nb	<u>0,08–2,36</u> 0,88	<u>0,08–15,27</u> 2,45	Sn	<u>0,00–146,20</u> 6,12	<u>0,75–145,03</u> 31,57
Mo	<u>0,60–53,77</u> 10,34	<u>0,28–9,67</u> 4,98	Число проб	31	18

Примечание. Анализы выполнены в Хабаровском инновационно-аналитическом центре ИТИГ ДВО РАН методом масс-спектрометрии с индуктивно-связанной плазмой на спектрометре ICP-MS Elan DRC II PerkinElmer (США). Над чертой – пределы содержания второстепенных элементов, под чертой – средние содержания.

Таблица 2
Минералы марганцевосиликатных пород Мокрушинской площади

	Породообразующие	Аксессорные		
		Родонит*	Апатит*	As-содержащий пирит*
Эндогенные	Пироксмангит*	Монацит*	Пирротин	Со- и Ni-содержащий пирротин
	Спессартин	Кобальтин	Халькопирит*	
	Манганокуммингтонит*	Никелин*		
	Манганогрюнерит**	Зигенит*	Галенит*	
	Пирофанит	Кобальтпентландит**	Бедный Fe и безжелезистый сфалерит*	
	Кварц	Богатая Со разновидность пентландита**	Самородная сурьма*	
Экзогенные	Гидроксиды Mn	Костибит	Самородное серебро*	
		Паркерит*	Сульфид серебра*	
		Соединение PbBi ₆ (Te,S) ₉ **		
			Самородное золото без примесей	
			Палладистое золото	

Примечание. Одной звездочкой помечены минералы, впервые обнаруженные в марганцевосиликатных породах Мокрушинской площади, двумя – в породах Сихотэ-Алиня.

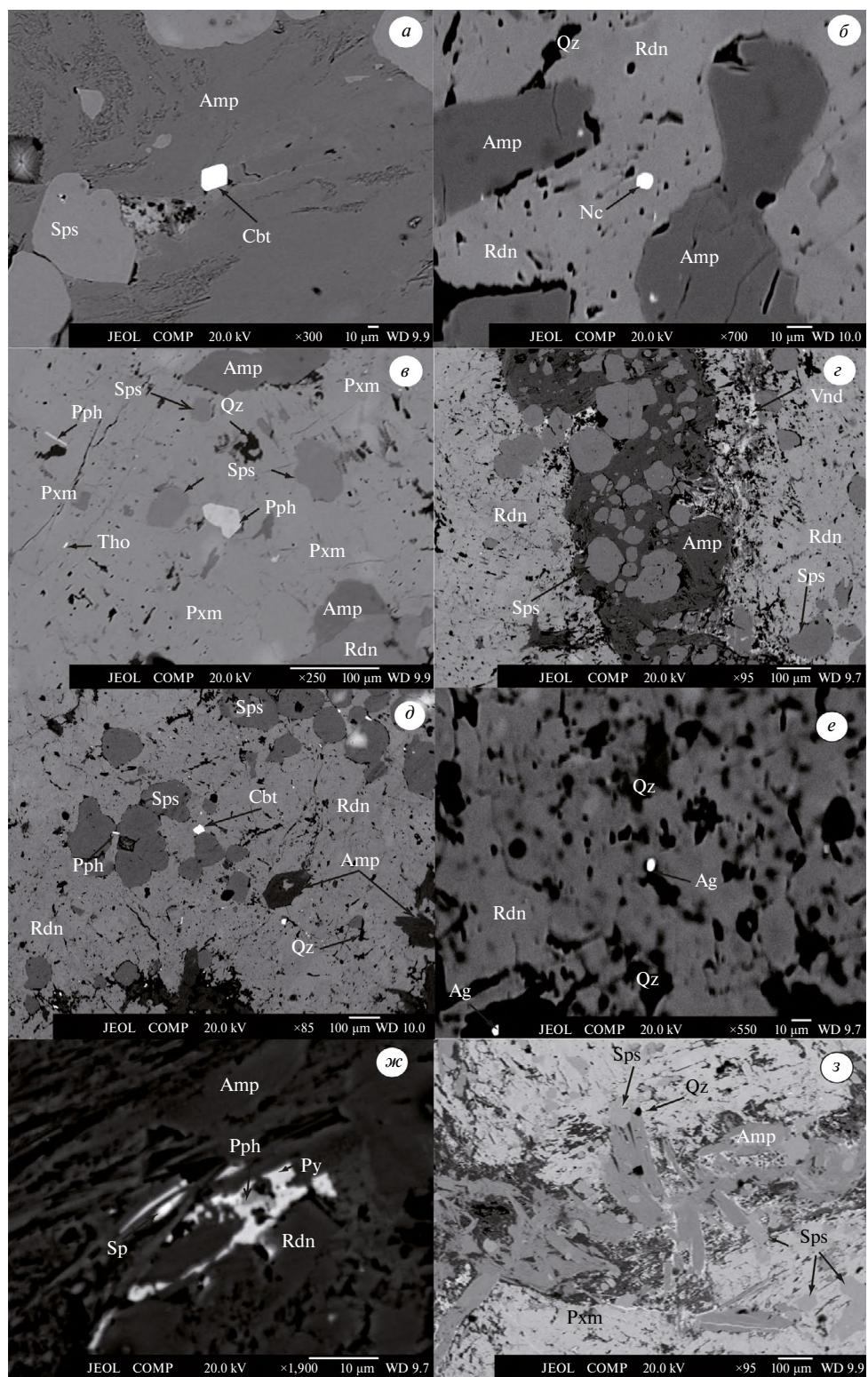


Рис. 2. Взаимоотношения минералов марганцевосиликатных пород Мокрушинской площади (пояснения см. в тексте). Amp – амфибол, Sps – спессартин, Cbt – кобальтин, Qz – кварц, Rdn – родонит, Nc – никелин, Pxm – пироксмантиг, Pph – пирофанит, Tho – торианит, Vnd – вернадит, Ag – серебро, Sp – сфалерит, Py – пирит

Таблица 3
Состав пироксеноидов, амфиболов и пирофанита Мокрушинской площади, мас. %

№	O	Si	Ti	Fe	Mn	Mg	Ca	Сумма	Формула
1	32,64	23,58	—	8,96	29,31	0,84	4,54	99,87	$(\text{Mn}_{0,63}\text{Fe}_{0,19}\text{Ca}_{0,14}\text{Mg}_{0,04})_{1,00}\text{Si}_{1,00}\text{O}_3$
2	37,44	22,65	—	7,73	25,68	0,87	4,07	98,44	$(\text{Mn}_{0,60}\text{Fe}_{0,19}\text{Ca}_{0,13}\text{Mg}_{0,04})_{0,97}\text{Si}_{1,03}\text{O}_3$
3	36,73	21,25	—	4,77	33,13	0,52	3,24	99,65	$(\text{Mn}_{0,78}\text{Fe}_{0,11}\text{Ca}_{0,10}\text{Mg}_{0,03})_{1,02}\text{Si}_{0,98}\text{O}_3$
4	35,64	21,33	—	8,1	28,39	0,61	3,92	97,98	$(\text{Mn}_{0,67}\text{Fe}_{0,19}\text{Ca}_{0,15}\text{Mg}_{0,03})_{1,02}\text{Si}_{0,98}\text{O}_3$
5	36,22	20,81	—	7,75	30,8	0,51	2,16	98,51	$(\text{Mn}_{0,74}\text{Fe}_{0,18}\text{Ca}_{0,07}\text{Mg}_{0,03}\text{Al}_{0,01})_{1,03}\text{Si}_{0,97}\text{O}_3$
6	37,50	23,51	—	8,85	27,59	1,05	2,61	101,11	$(\text{Mn}_{0,63}\text{Fe}_{0,20}\text{Ca}_{0,08}\text{Mg}_{0,05}\text{Al}_{0,01})_{0,97}\text{Si}_{1,03}\text{O}_3$
7	37,61	21,16	—	3,45	33,87	1,15	0,18	97,43	$(\text{Mn}_{0,83}\text{Fe}_{0,08}\text{Ca}_{0,01}\text{Mg}_{0,06})_{0,98}\text{Si}_{1,02}\text{O}_3$
8	40,73	24,48	—	15,86	11,20	5,97	0,49	98,73	$(\text{Ca}_{0,12}\text{Fe}_{2,63}\text{Mg}_{2,28}\text{Mn}_{1,89})_{6,92}\text{Si}_{8,08}\text{O}_{22}(\text{OH})_2$
9	41,67	25,01	—	15,15	10,34	7,06	0,48	99,71	$(\text{Ca}_{0,11}\text{Mg}_{2,64}\text{Fe}_{2,46}\text{Mn}_{1,71})_{6,92}\text{Si}_{8,08}\text{O}_{22}(\text{OH})_2$
10	40,39	25,16	—	15,75	10,79	6,71	0,52	99,32	$(\text{Ca}_{0,12}\text{Mg}_{2,49}\text{Fe}_{2,54}\text{Mn}_{1,77})_{6,92}\text{Si}_{8,08}\text{O}_{22}(\text{OH})_2$
11	40,43	24,55	—	15,95	11,23	5,68	0,50	98,33	$(\text{Ca}_{0,11}\text{Fe}_{2,66}\text{Mg}_{2,18}\text{Mn}_{1,91})_{6,86}\text{Si}_{8,14}\text{O}_{22}(\text{OH})_2$
12	41,87	23,37	—	15,97	11,08	5,36	0,38	98,02	$(\text{Ca}_{0,09}\text{Fe}_{2,77}\text{Mg}_{2,14}\text{Mn}_{1,95})_{6,95}\text{Si}_{8,05}\text{O}_{22}(\text{OH})_2$
13	40,79	22,91	—	18,97	12,39	3,53	0,17	98,77	$(\text{Ca}_{0,04}\text{Fe}_{3,33}\text{Mg}_{1,42}\text{Mn}_{2,21})_{7,00}\text{Si}_{8,00}\text{O}_{22}(\text{OH})_2$
14	31,33	—	31,64	14,61	20,29	—	—	97,86	$(\text{Mn}_{0,57}\text{Fe}_{0,41})_{0,98}\text{Ti}_{1,02}\text{O}_3$
15	31,09	—	31,33	12,59	22,54	—	—	97,55	$(\text{Mn}_{0,64}\text{Fe}_{0,35})_{0,99}\text{Ti}_{1,01}\text{O}_3$
16	31,20	5,03	27,56	11,29	24,51	—	0,71	100,61	$(\text{Mn}_{0,72}\text{Fe}_{0,33})_{1,05}(\text{Ti}_{0,94}\text{V}_{0,01})_{0,95}\text{O}_3$
17	32,31	—	28,83	12,04	24,08	—	—	97,26	$(\text{Mn}_{0,70}\text{Fe}_{0,34})_{1,04}\text{Ti}_{0,96}\text{O}_3$
18	31,44	2,09	27,35	5,82	29,15	—	—	95,84	$(\text{Mn}_{0,88}\text{Fe}_{0,17})_{1,05}\text{Ti}_{0,95}\text{O}_3$

Примечание. Кроме указанных элементов в анализах: 5 – 0,26 Al, 16 – 0,31 V. Образцы: М-88-15 (1, 2, 9, 14, 15, 18), М-88-40 (10, 17), М-88-49 (5, 11–13), М-86-55 (6, 16), М-89-74 (3, 7), М-89-62 (4). Минералы: родонит (1–4), пироксмангит (5–7), мanganогрюнерит (8, 10–13), мanganокуммингтонит (9), пирофанит (14–18). Прочерк – не обнаружено. Отсутствующие в формулах пирофанита Si и Ca являются чужеродными («прихваченными» из окружающих участков ашлайфов).

Таблица 4
Состав граната марганцевосиликатных пород Мокрушинской площади, мас. %

№	O	Si	Ti	Al	Fe	Mn	Mg	Ca	Сумма	Формула
1	38,55	16,94	0,25	10,30	2,07	28,16	—	2,92	99,19	$(\text{Mn}_{2,54}\text{Fe}_{0,10}\text{Ca}_{0,36})_{3,00}(\text{Al}_{1,89}\text{Ti}_{0,03}\text{Fe}_{0,08})_{2,00}\text{Si}_{3,00}\text{O}_{12}$
2	38,21	16,79	0,17	10,40	2,05	29,24	—	2,41	99,27	$(\text{Mn}_{2,63}\text{Fe}_{0,11}\text{Ca}_{0,30})_{3,04}(\text{Al}_{1,91}\text{Ti}_{0,02}\text{Fe}_{0,07})_{2,00}\text{Si}_{2,96}\text{O}_{12}$
3	38,34	16,85	0,17	10,33	1,6	30,03	—	1,69	99,01	$(\text{Mn}_{2,73}\text{Fe}_{0,07}\text{Ca}_{0,21})_{3,01}(\text{Al}_{1,91}\text{Ti}_{0,02}\text{Fe}_{0,07})_{2,00}\text{Si}_{2,99}\text{O}_{12}$
4	40,28	16,06	0,19	10,57	2,3	28,48	—	2,82	100,7	$(\text{Mn}_{2,60}\text{Ca}_{0,35}\text{Fe}_{0,19})_{3,14}(\text{Al}_{1,96}\text{Fe}_{0,02}\text{Ti}_{0,02})_{2,00}\text{Si}_{2,86}\text{O}_{12}$
5	38,88	16,04	0,18	10,32	1,48	29,36	—	2,53	98,79	$(\text{Mn}_{2,59}\text{Ca}_{0,32}\text{Fe}_{0,20})_{3,11}(\text{Al}_{1,97}\text{Ti}_{0,02}\text{Fe}_{0,01})_{2,00}\text{Si}_{2,89}\text{O}_{12}$

Таблица 4. Окончание

№	O	Si	Ti	Al	Fe	Mn	Mg	Ca	Сумма	Формула
6	37,99	16,35	—	10,25	1,98	30,81	—	1,74	99,11	$(\text{Mn}_{2,79}\text{Ca}_{0,22}\text{Fe}_{0,08})_{3,09}$ $(\text{Al}_{1,90}\text{Fe}_{0,10})_{2,00}\text{Si}_{2,91}\text{O}_{12}$
7	38,71	15,89	—	10,46	1,88	29,51	—	2,46	98,9	$(\text{Mn}_{2,70}\text{Ca}_{0,31}\text{Fe}_{0,13})_{3,14}$ $(\text{Al}_{1,96}\text{Fe}_{0,04})_{2,00}\text{Si}_{2,86}\text{O}_{12}$
8	39,22	16,49	—	10,06	1,54	28,13	—	2,38	98,06	$(\text{Mn}_{2,63}\text{Ca}_{0,30}\text{Fe}_{0,07})_{3,00}$ $(\text{Al}_{1,91}\text{Fe}_{0,07}\text{V}_{0,02})_{2,00}\text{Si}_{3,00}\text{O}_{12}$
9	39,25	16,48	0,18	9,76	2,57	24,84	0,26	2,98	96,33	$(\text{Mn}_{2,36}\text{Ca}_{0,38}\text{Fe}_{0,14}\text{Mg}_{0,06})_{2,94}$ $(\text{Al}_{1,88}\text{Fe}_{0,10}\text{Ti}_{0,02})_{2,00}\text{Si}_{3,06}\text{O}_{12}$
10	39,58	16,57	0,22	9,85	3,14	25,16	0,44	2,73	97,68	$(\text{Mn}_{2,35}\text{Ca}_{0,35}\text{Fe}_{0,18}\text{Mg}_{0,09})_{2,97}$ $(\text{Al}_{1,87}\text{Fe}_{0,11}\text{Ti}_{0,02})_{2,00}\text{Si}_{3,03}\text{O}_{12}$
11	38,04	16,89	0,24	10,31	2,1	26,34	—	2,52	96,44	$(\text{Mn}_{2,45}\text{Ca}_{0,32}\text{Fe}_{0,17})_{2,94}$ $(\text{Al}_{1,95}\text{Fe}_{0,02}\text{Ti}_{0,03})_{2,00}\text{Si}_{3,06}\text{O}_{12}$

Примечание. Кроме того, в ан. 8 содержится 0,24 мас. % V. Образцы: М-89-74 (3, 6), М-88-15(1, 2, 4, 10), М-89-62 (5), М-88-40 (7, 8), М-88-55 (9), М-86-27 (11). Прочерк – не обнаружено.

Таблица 5
Состав сульфидов, сульфоарсенидов, сульфоантимонидов и сульфотеллуридов
из марганцевосиликатных пород Мокрушинской площади, мас. %

№	Fe	Co	Ni	S	As	Sb	Te	Pb	Bi	Сумма	Формула
1	1,29	34,58	—	22,24	42,22	—	—	—	—	100,33	$(\text{Co}_{0,94}\text{Fe}_{0,04})_{0,98}$ $(\text{As}_{0,91}\text{S}_{1,11})_{1,02}$
2	—	32,46	4,25	20,96	43,90	—	—	—	—	101,57	$(\text{Co}_{0,89}\text{Ni}_{0,12})_{1,01}$ $(\text{As}_{0,94}\text{S}_{1,05})_{1,99}$
3	2,04	26,80	4,35	20,32	47,94	—	—	—	—	101,45	$(\text{Co}_{0,75}\text{Ni}_{0,12}\text{Fe}_{0,06})_{0,93}$ $(\text{As}_{1,04}\text{S}_{1,03})_{2,07}$
4	2,44	26,30	7,55	17,09	47,24	—	—	—	—	100,62	$(\text{Co}_{0,75}\text{Ni}_{0,22}\text{Fe}_{0,07})_{1,04}$ $(\text{As}_{1,06}\text{S}_{0,90})_{1,96}$
5	2,33	29,42	4,90	17,64	45,54	—	—	—	—	99,83	$(\text{Co}_{0,84}\text{Ni}_{0,14}\text{Fe}_{0,07})_{1,05}$ $(\text{As}_{1,02}\text{S}_{0,93})_{1,95}$
6	1,17	29,41	6,54	19,8	44,75	—	—	—	—	101,67	$(\text{Co}_{0,81}\text{Ni}_{0,18}\text{Fe}_{0,03})_{1,02}$ $(\text{As}_{0,98}\text{S}_{1,00})_{1,98}$
7	2,07	26,31	7,2	19,05	45,84	—	—	—	—	100,47	$(\text{Co}_{0,74}\text{Ni}_{0,20}\text{Fe}_{0,06})_{1,00}$ $(\text{As}_{1,01}\text{S}_{0,99})_{2,00}$
8	1,61	28	6,7	19,57	44,03	—	—	—	—	99,91	$(\text{Co}_{0,78}\text{Ni}_{0,19}\text{Fe}_{0,05})_{1,02}$ $(\text{As}_{0,97}\text{S}_{1,01})_{1,98}$
9	0,30	33,27	3,60	20,24	42,12	—	—	—	—	99,53	$(\text{Co}_{0,93}\text{Ni}_{0,10}\text{Fe}_{0,01})_{1,04}$ $(\text{As}_{0,92}\text{S}_{1,04})_{1,96}$
10	1,53	2,06	40,26	—	54,61	1,41	—	—	—	99,87	$(\text{Ni}_{0,91}\text{Co}_{0,05}\text{Fe}_{0,04})_{1,00}$ $(\text{As}_{0,98}\text{Sb}_{0,02})_{1,00}$
11	5,87	30,58	22,38	42,70	—	—	—	—	—	101,53	$(\text{Co}_{1,55}\text{Ni}_{1,14}\text{Fe}_{0,31})_{3,00}$ $\text{S}_{4,00}$

Таблица 5. Окончание

№	Fe	Co	Ni	S	As	Sb	Te	Pb	Bi	Сумма	Формула
12	10,59	35,89	20,63	32,85	—	—	—	—	—	99,96	$(Co_{4,75}Ni_{2,75}Fe_{1,49})_{8,99}S_{8,01}$
13	11,08	28,06	30,75	32,22	0,89	—	—	—	—	103,00	$(Ni_{4,02}Co_{3,65}Fe_{1,52})_{9,20}(S_{7,71}As_{0,09})_{7,80}$
14	10,38	25,26	30,82	30,81	1,02	—	—	—	—	98,29	$(Ni_{4,22}Co_{3,45}Fe_{1,50})_{9,16}(S_{7,73}As_{0,11})_{7,84}$
15	—	23,67	4,03	15,16	0,70	57,14	—	—	—	100,70	$(Co_{0,85}Ni_{0,15})_{1,00}(Sb_{0,98}As_{0,02})_{1,00}S_{1,00}$
16	—	24,33	3,96	15,22	0,72	58,61	—	—	—	102,84	$(Co_{0,86}Ni_{0,14})_{1,00}(Sb_{0,98}As_{0,02})_{1,00}S_{1,00}$
17	—	27,00	—	15,69	—	57,43	—	—	—	100,12	$Co_{0,97}Sb_{1,00}S_{1,03}$
18	—	—	25,87	8,76	—	2,56	1,99	—	59,56	98,74	$Ni_{2,98}(Bi_{1,93}Sb_{0,14})_{2,07}(S_{1,85}Te_{0,10})_{1,95}$
19	—	—	—	7,81	0,83	—	22,13	9,86	59,38	100,01	$Pb_{1,00}Bi_{5,99}(Te_{3,65}As_{0,23}S_{5,13})_{9,01}$

Примечание. Образцы: М-86-15 (1, 13), М-86-27 (2, 9, 15–17), М-86-79 (3, 10, 14), М-89-74 (4–6), М-86-89 (7, 8), М-86-62 (11, 12, 18, 19). Минералы: кобальтин (1–9), никелин (10), зигенит (11), кобальтпентландит (12), Co-содержащий пентландит (13, 14), костибит (15–17), паркерит (18), $PbBi_6(Te, S)_9$ (19). Прочерк – не обнаружено.

Таблица 6

Состав сульфидов из марганцевосиликатных пород Мокрушинской площади, мас. %

№	Fe	Co	Ni	Cu	Zn	S	Ag	Sn	Сумма	Минерал	Формула
1	42,74	—	—	—	—	54,08	—	—	97,69	Пирит	$Fe_{0,94}(S_{2,05}As_{0,01})$
2	61,04	—	—	—	—	38,94	—	—	99,98	Пирротин	$Fe_{0,90}S_{1,00}$
3	55,58	3,46	2,77	—	—	38,83	—	—	100,64	Пирротин	$(Fe_{0,82}Co_{0,05}Ni_{0,04})S_{1,00}$
4	58,03	—	—	—	—	38,02	—	—	96,05	Пирротин	$Fe_{0,88}S_{1,00}$
5	63,28	—	—	—	—	38,24	—	—	101,52	Пирротин	$Fe_{0,95}S_{1,00}$
6	62,51	—	0,65	—	—	37,95	—	—	101,11	Пирротин	$(Fe_{0,95}Ni_{0,01})S_{1,00}$
7	58,79	0,23	—	—	—	38,90	—	—	98,02	Пирротин	$Fe_{0,87}S_{1,00}$
8	1,12	—	—	—	65,84	32,94	—	—	99,90	Сфалерит	$(Zn_{0,98}Fe_{0,02})S_{1,00}$
9	5,75	—	—	—	63,16	34,29	—	—	103,20	Сфалерит	$(Zn_{0,90}Fe_{0,10})S_{1,00}$
10	9,23	—	—	—	53,6	33,62	—	—	100,26	Сфалерит	$(Zn_{0,78}Fe_{0,16}Mn_{0,06})S_{1,00}$
11	—	—	—	—	—	13,27	88,09	—	101,36	Сульфид Ag	$Ag_{1,99}S_{1,01}$
12	12,47	—	—	27,72	2,51	29,63	—	26,94	99,27	Станнин	$(Cu_{1,89}Zn_{0,13})(Fe_{0,97}Zn_{0,03})Sn_{0,98}S_{4,00}$

Примечание. Образцы: М-86-27 (1–3, 7, 9–12), М-88-49 (4), М-88-74 (5, 6), М-88-15 (8). Кроме указанных элементов в ан. 1 – 0,87 мас. % As, в ан. 10 – 3,81 мас. % Mn. Прочерк – не обнаружено.

Обсуждение результатов исследований

В марганцевосиликатных породах присутствуют разновременные ассоциации, связанные с контактовым метаморфизмом при внедрении Владимирского массива и периодами циркуляции подвижной флюидной фазы в зонах повышенной проницаемости на фоне понижения температуры по мере его остывания. Наиболее ранними являются продукты метаморфизма кремнисто-родахрозитовых пород, содержащие пироксеноиды, амфибол, пирофанит и (редко) кварц в разных комбинациях, рассеянные кристаллы соединений Со и Ni, пирита, галенита, сфалерита и халькопирита. Более поздняя спессартин-амфиболовая ассоциация образует прожилки в марганцевосиликатных породах. На эти ассоциации наложены гидротермальные изменения, с которыми связано образование реакционных каемок на контактах амфибола и пироксеноидов. Они состоят из более мелких кристаллов и бесформенных выделений амфибола, а также кварца и (иногда) реликтового перекристаллизованного пироксеноида. С этим же процессом связано образование по пироксеноидам (вдоль спайности или границ их кристаллов) многочисленных мельчайших выделений амфибола и (или) кварца и мелких рассеянных кристаллов самородного серебра, соединения $PbBi_6(Te,S)_6$, Ag_2S , пирита, пирротина, сфалерита, халькопирита, галенита, станинина и торианиита. Наиболее поздней (из эндогенных) является спессартин-амфиболовая ассоциация, наложенная на предыдущую.

Породообразующие минералы

Пироксеноиды

Родонит и пироксмангит состава $MnSiO_3$ являются полиморфными модификациями. Из них пироксмангит – фаза более высокого давления и низкой температуры. В этих минералах Mn обычно частично замещен Ca, Mg или Fe, поэтому вместо их моновариантной ассоциации в природе встречается дивариантная. Структура родонита более благоприятна для вхождения Ca, пироксмангита – Mg и Fe. Пироксмангит широко распространен на Мокрушинской площади и считается редким минералом. В Сихотэ-Алине он известен в рудах Южного Ag–Pb–Zn-месторождения, а также в марганцевосиликатных породах Садовой, Широкопаддинской и Горной площадей. Родонит Мокрушинской площади (см. табл. 3) относится к бедной кальцием или умеренно кальциевой разновидности (8–14 мол. % $CaSiO_3$). Он отличается умеренной или высокой железистостью (11–21 мол. % $FeSiO_3$) и низкой магнезиальностью (2–4 мол. % $MgSiO_3$). Количество $MnSiO_3$ изменяется в пределах 62–78 мол. %. Пироксмангит (см. табл. 3) тоже характеризуется низкими или умеренными для этого минерала содержаниями кальциевого минала (1–9 мол. %), умеренными и высокими – железистого (8–21 мол. %). Количество $MnSiO_3$ изменяется от 65 до 85 мол. %. Содержание $MgSiO_3$ составляет всего лишь 3–6 мол. %. На диаграмме (рис. 3, а) точки родонита и пироксмангита располагаются на нижней и верхней границах полей составов этих минералов соответственно, что свидетельствует в пользу их равновесных взаимоотношений.

Спессартин

В марганцевосиликатных породах Сихотэ-Алиня гранат представлен спессартином с переменным количеством гроссулярового, альмандинового и пиропового миналов с незначительной примесью Fe^{3+} , Ti или V. Спессартин Мокрушинской площади (см. табл. 4) относится к высокомарганцовистой (80–91 мол. % спессартинового минала), бедной Ca (7–13 гроссулярового минала) и Fe (2,5–6,5 альмандинового минала) разновидностям, иногда содержащим немного Mg, Ti или V. Его состав зависит от химического состава ассоциаций. Например, точки этого минерала из бедных Ca, но богатых Mg пород, сложенных пироксмангит-родонитовой ассоциацией, располагаются между полями пироксмангита и родонита или (при более железистой ассоциации) в поле родонита вблизи его нижней границы (см. рис. 3, а, б). В более богатых Ca породах, сложенных только родонитом, точки граната обычно располагаются во всем поле этого минерала.

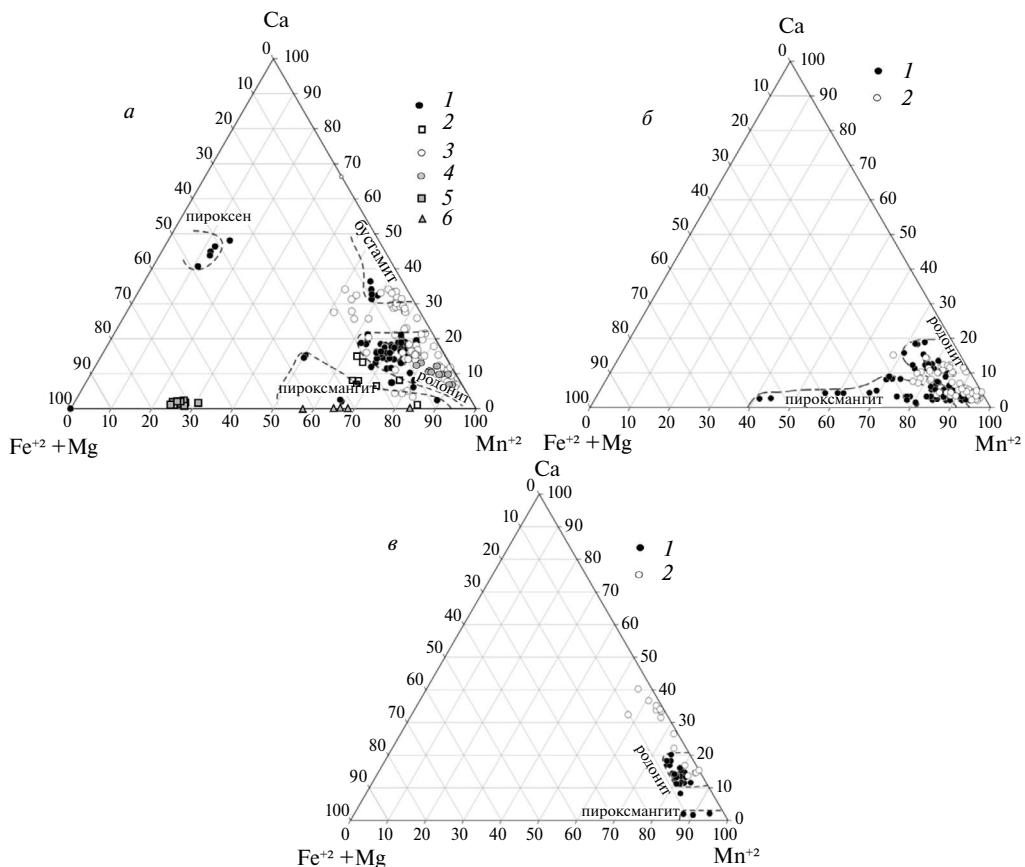


Рис. 3. Особенности состава породообразующих минералов марганцевосиликатных пород Сихотэ-Алиня. *а*: пироксены и пироксеноиды Широкопаддинской (1) и Мокрушинской (2) площадей; гранат Широкопаддинской (3) и Мокрушинской (4) площадей; амфибол (5) и пирофанит (6) Мокрушинской площади. *б, в*: 1, 2 – пироксеноиды и гранат Горной (6) и Садовой (8) площадей

При появлении в ассоциации более кальциевого, чем родонит, минерала, например бустамита или аксинита, точки локализуются за пределами поля родонита в более кальциевой области. Однако появление богатого Са граната может быть обусловлено не химическим составом ассоциации, а влиянием температуры на распределение этого элемента между гранатом и родонитом. Таким образом, распределение Са можно использовать для оценки температуры образования гранат-родонитовых пар. На диаграмме (рис. 4, *а*) показаны точки существующих граната и родонита. Их положение согласуется с геологической позицией гранат-родонитовых ассоциаций и оценками температуры образования авторами использованных работ.

Диаграмма позволяет объяснить ассоциацию богатого Са спессартина в марганцевосиликатных породах Садовой площади с бедными Са пироксеноидами (см. рис. 3, *в*) низкой температурой кристаллизации (~250–300 °C). Этот вывод подтверждается отсутствием (в отличие от других площадей) выходов более или менее крупных магматических тел в пределах Садовой площади. Расположение точек спессартин-родонитовых пар Широкопаддинской площади в виде шлейфа, ограниченного изотермами ~540 и 250 °C, объясняется значительной протяженностью (~4,3 км) изученной части горизонта марганцевосиликатных пород начиная от контакта Широкопаддинского массива. Высокая и почти одинаковая температура кристаллизации (~500 °C) гранат-родонитовых пар Мокрушинской площади

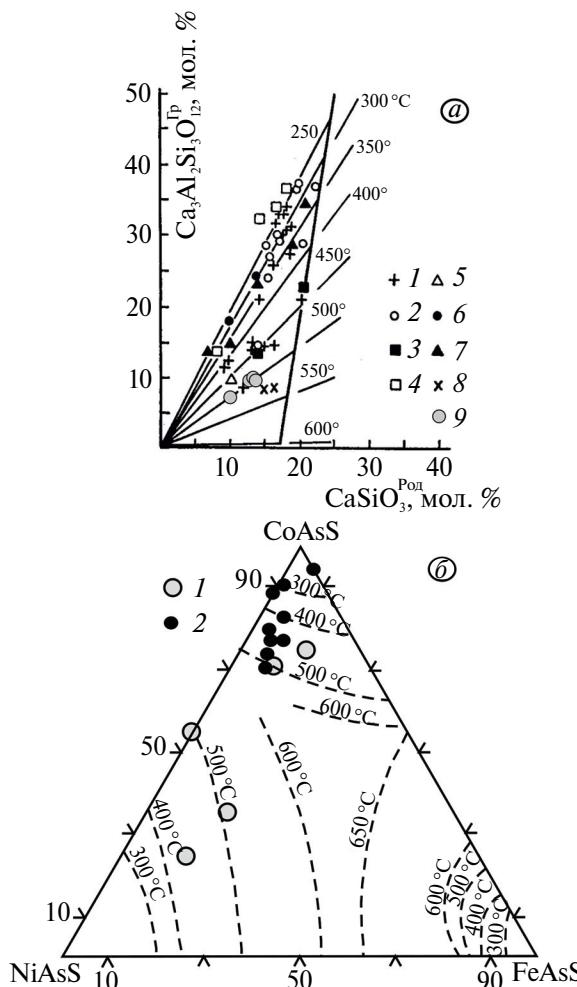


Рис. 4. Изотермы (°С) распределения Са между спессартином и родонитом (при $P \sim 1$ кбар) и распределение Са в природных спессартин-родонитовых парах [2] (а); положение точек кобальтина и герцдорфита Белогорского месторождения [4] и Мокрушинской площади на диаграмме FeAsS–CoAsS–NiAsS (мол. %) (б). а: 1 – Широкопаддинская площадь; 2 – Au–Ag–месторождение Дукат (Россия); 3 – Pb–Zn–месторождение Брокен Хилл (Австралия); 4 – Еркинская зона (Садовая площадь); 5 – Арсеньевское оловорудное месторождение (Россия); 6 – метаморфизованные пластовые марганцевые руды Пиз-Кэм (Швейцария); 7 – марганцевосиликатно–сульфидные жилы вблизи гранитного массива Аар (Швейцария); 8 – метаморфизованные Mn руды месторождения Буритирама (Бразилия); 9 – Мокрушинская площадь; линия I–I отвечает составам родонита и спессартина в равновесии с бустами том. б: Белогорское месторождение (1) и Мокрушинская (2) площадь. Изотермы по Д.Д. Клемму [4]

(см. рис. 4, а) согласуется с расположением изученных выходов в непосредственной близости от контактов Владимирского массива.

Амфиболы

На Мокрушинской площади встречаются высокомарганцовистые разновидности куммингтонит–грюнеритового ряда (см. табл. 3, рис. 3, а). Они представлены богатым Mg манганогрюнеритом, впервые обнаруженным в Сихотэ-Алине, и богатым Fe²⁺ манганокуммингтонитом. Обе разновидности, совсем не содержащие щелочей Al и Ti и по составу непрерывно переходящие одна в другую, бедны Ca-миналом (0,6–2,3 мол. %). По содержаниям Fe- и Mg-миналов они близки, но в некоторых случаях первый значительно преобладает над

вторым. Содержание Mn-минала почти постоянно (24,7–28,1, одно значение 31,6 мол. %). Mn почти полностью занимает кристаллохимическую позицию В (см. табл. 3), поэтому состав амфиболов практически соответствует идеальной формуле $Mn_2(Fe,Mg)_5Si_8O_{22}(OH)_2$. Появление амфиболов куммингтонит-грюнеритового ряда совместно с родонитом и пироксмангитом является следствием низкой кальциевости ассоциаций и высоких суммарных содержаний Fe и Mg в породах.

Пирофанит

Пирофанит распространен в ассоциациях марганцевосиликатных пород Мокрушинской, Широкопаддинской, Садовой и Горной площадей. Содержание в нем ильменитового минала на Широкопаддинской площади колеблется от 6 до 44 мол. %, достигая наиболее высоких значений в спессартин-пирофанит-клинопироксеновой и спессартин-пирофанит-куммингтонит-родохрозит-пиросмалит-родонитовой ассоциациях. На Садовой и Горной площадях он отличается низкой железистостью (0–13 и 4–9 мол. % ильменитового минала соответственно) из-за низкой железистости ассоциаций и, следовательно, протолитов марганцевосиликатных пород. Пирофанит Мокрушинской площади (см. табл. 3) по содержанию ильменитового минала (16,2–41,8 мол. %) близок к этому минералу Широкопаддинской площади, но в основном богат Fe, что указывает на участие в равновесиях с амфиболом (см. рис. 3, а). Иногда встречается V-содержащая разновидность, обычно вместе с V-содержащим спессартином.

Аксессорные минералы

Соединения никеля и кобальта

Костибит относится к редким минералам. Известен в гидротермальных Pb–Zn–Cu–Ag и Au–Ag [5], а также в колчеданных месторождениях кипрского и бесси типов и их докембрийских аналогах [6]. Обычно содержит немного Ni (первые проценты), Fe (доли процента – первые проценты) и As (десятые доли процента). На Мокрушинской площади встречается редко в виде включений в пироксеноидах и амфиболе ранних ассоциаций. Особенностью состава является относительно высокое для него содержание Ni (около 14 мол. % ульманитового минала) и примесь As (см. табл. 5).

Кобальтин. Крайние и промежуточные члены кобальтин-герсдорфитового ряда, иногда с примесью Sb, Cu и Te распространены в марганцевосиликатных породах Сихотэ-Алиня. На Мокрушинской площади встречается только кобальтин в виде включений в пироксеноидах и амфиболе. Содержит немного Ni (9,6–21,2 мол. % герсдорфитового минала) и Fe (1,0–6,7 мол. % арсенопиритового минала) (см. табл. 5). Температура его кристаллизации ≥ 500 °C (см. рис. 4, б) согласуется с температурой контактового метаморфизма, определенной выше по составам гранат-родонитовых пар. Она соответствует также температуре метаморфизма (~500–550 °C) протолитов руд и пород (обогащенных Mn металлоносных осадков) других геологических объектов, расположенных у контактов Владимирского гранитоидного массива. К ним относятся Белогорское магнетитовое месторождение с температурой ~550 °C по составам минералов кобальтин-герсдорфитового ряда (см. рис. 4, б) и клинопироксен-бустамитовой ассоциации, железорудное месторождение Мраморный Мыс и марганцевосиликатные породы Широкопаддинской площади с температурой ~500 °C по составам минералов родонит-бустамитовой ассоциации [2].

Кобальтпентланит и *богатый Со пентланит*. В системе $Co_8S_9-Ni_8S_9-Fe_8S_9$ есть область смесимости, границы которой зависят от температуры. Она разделена на части, соответствующие пентланиту и считающемуся редким минералом кобальтпентланиту (рис. 5, а).

Кобальтпентланит и пентланит – типоморфные минералы современных гидротермальных сульфидных построек, связанных с серпентинизированными ультрабазитами Срединно-Атлантического хребта [8]. Кобальтпентланит распространен в колчеданных месторождениях кипрского типа и типа бесси, ассоциирующих с недифференцированны-

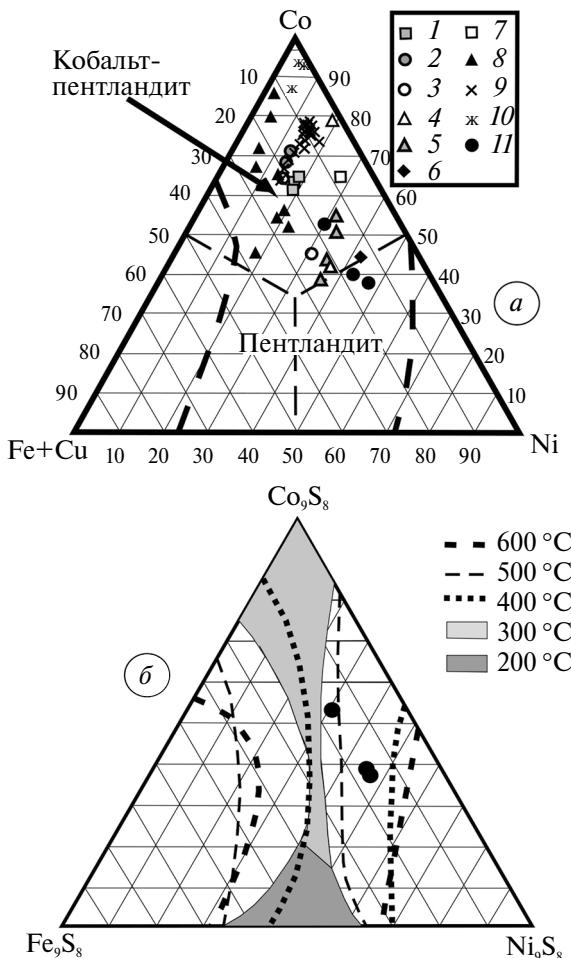


Рис. 5. Положение точек кобальтпентландита и Со-содержащего пентландита Мокрушинской площади в сравнении с составами кобальтпентландита из проявлений, связанных с основными и ультраосновными породами и скарнами на диаграмме Co-(Fe,Cu)-Ni (ат. %): Vysoká-Zlatno (1), Varislahti (2), Outokumpu (3), Univek (4), Dumont (5), Cassiar (6), Brassey (7), Bushveld (8), Mid-Atlantic Ridge (9), Ocna de Fier (10), Мокрушинская площадь (11). Основа диаграммы с точками кобальтпентландита из других мест заимствована из работы [7]

ми (офиолитовыми) базальтоидными формациями [6]. Он известен в медно-магнетитовых проявлениях в серпентинитах Южного Урала [9], скарнах [7], рудах Au-Ag и других жильных месторождений [5]. На Мокрушинской площади встречаются кобальтпентландит и пентландит. Они, как и другие соединения Со и Ni, образуют рассеянные включения в пироксеноидах и амфиболе ранних ассоциаций. Характер контактов включений с минералами-хозяевами свидетельствует об их одновременном образовании. Кобальтпентландит Мокрушинской площади относительно богат Ni и беден Со и Fe (см. табл. 5). На диаграмме (см. рис. 5, а) точка состава этого минерала располагается вблизи нижней границы его поля. Пентландит богат Со и содержит As. На диаграмме (см. рис. 5, а) его точки располагаются у границы с полем кобальтпентландита. Положение точек пентландита и кобальтпентландита на диаграмме (см. рис. 5, б) в пределах трех частично перекрывающихся температурных полей (400, 500 и 600 °C) не противоречит приведенным выше данным об образовании ранних ассоциаций пород Мокрушинской площади при температуре ~500–550 °C.

Паркерит $Ni_3Bi_2S_2$ относится к редким минералам. На Мокрушинской площади встречается редко в виде включений в родоните и мanganогрюнерите. Содержит примесь Sb

и Te (см. табл. 5). Паркерит обычно встречается вместе с минералами Pt, Ni и Co. На Горной площади наряду с ним распространены соединения Ni и Co, самородная платина, твердые растворы и соединения Pt, Pd, Ag, Bi и Sn. В Грикваленде и Пондоленде (Южная Африка) паркерит обнаружен вместе с магнетитом, ильменитом, сперрилитом, пиритом, бравоитом, валлеритом, никелином и миллеритом. В Cu–Ni-месторождении Садбери он ассоциирует с галенитом, самородным висмутом, висмутином, тетрадимитом, гесситом, маухеритом, никелином, сперрилитом и самородным Au. Паркерит встречается в Норильском рудном поле вместе с висмутогаухекорнитом и другими минералами Ni [10], в жилах пятиэлементной формации рудного поля Кобальт-Говганга в Канаде [11], Шахтаминского молибденового месторождения Восточного Забайкалья [12], в месторождении Тэутэджак на Чукотке [13] и в других местах. Паркерит устойчив в широком температурном интервале. По данным Ю. Хана [14], в кобальтовых и никелевых рудах месторождения Сиариаму (Китай) он образовывался из продуктов ликвации расплавов при температуре ~830–650 °C вместе с арсеногаухекорнитом, маухеритом и никелином. В рудах Норильского рудного поля этот минерал возникал в результате гидротермально-метаморфических процессов при 216–127 °C. На Мокрушинской площади он встречается в ассоциациях, формировавшихся при температуре ~500–550 °C.

Зигенит – типоморфный минерал колчеданных месторождений кипрского типа и типа бесси, связанных с недифференцированными базальтоидными формациями [6], также встречается в сульфидном Cu–Ni-месторождении Шануч на Камчатке [15]. Известен в рудах Майского золотокварцевого месторождения [5] и рудопроявления Карьер Койкары [16] в Карелии, на Шиловском медном месторождении скарновой формации и Сарановском месторождении хромитов [17], а также распространен в пикритовых долеритовых комплексах Урала [18]. На Мокрушинской площади зигенит обогащен Fe (см. табл. 5) и как акцессорный минерал встречается в ранних ассоциациях, что согласуется с его устойчивостью в гидротермальных условиях при температуре ~500 °C [19].

Никелин устойчив в широком температурном интервале. По данным работы [14], в Co–Ni-рудах месторождения Сиариаму (Китай) он образовался из продуктов ликвации расплавов при ~830–650 °C вместе с арсеногаухекорнитом, маухеритом и паркеритом. На Норильском рудном поле этот минерал, образующий полную серию твердых растворов с брейгаупитом, возник в результате гидротермально-метаморфических процессов при температуре 216–127 °C [20]. Никелин, содержащий Sb или Sb и S, ранее был обнаружен на Садовой ($T_{\text{крист.}} \sim 250$ –300 °C) и Горной площадях соответственно. На Мокрушинской площади (см. табл. 5) он встречается в ранних ассоциациях, формировавшихся при температуре ~500–550 °C.

Соединения прочих металлов

Эта группа включает пирит, пирротин, сфалерит, халькопирит, галенит, станинн, Ag_2S и $\text{PbB}_6(\text{Te}, \text{S})$. Первые четыре минерала отмечались в ранних и поздних, а остальные – в поздних ассоциациях. На Мокрушинской площади пирит представлен As-содержащей разновидностью, в пирротине присутствует немного Ni или Co. Сфалерит не содержит Mn и беден Fe. Особенности его состава (см. табл. 6) обусловлены ассоциацией с пиритом. Максимальные содержания Fe (10–16 мол. % FeS) свойственны сфалериту из поздних ассоциаций с пиритом и пирротином и, очевидно, отвечают температуре ~200–250 °C (рис. 6, а). Близкой температуре (~250–300 °C) соответствует изменение состава пирротина в ассоциации с пиритом и сфалеритом поздних ассоциаций (см. рис. 6, б). Пирротин ранних ассоциаций с пиритом отличается меньшей мольной долей FeS, в целом согласующейся с температурой кристаллизации ~500–550 °C (см. рис. 6, б).

Станинн обогащен Zn (см. табл. 6). Температура образования с учетом распространения в поздних ассоциациях с пирротином, пиритом и сфалеритом и положения точки (см. темный кружок на рис. 6, в), вынесенной по составам станинна и ассоциирующего с ним сфалерита, составляет ~250–300 °C и согласуется с температурой образования этого минерала в ассоциациях с пиритом и (или) пирротином в Sn-содержащих жильных и скарновых месторождениях небольшой глубинности [22]. $\log f\text{S}_2$ (~−9,5), определенный по

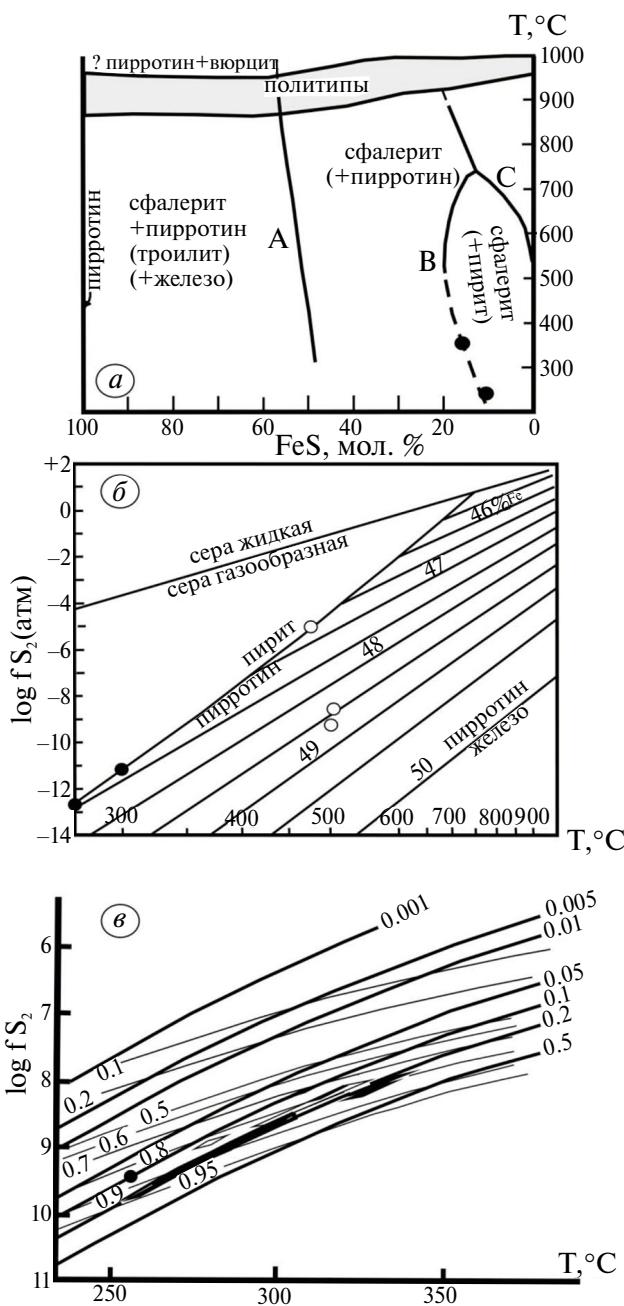


Рис. 6. Политермическое сечение ZnS–FeS (a); фазовые отношения в системе Fe–S в зависимости от температуры и фугитивности серы при общем давлении 1 бар по П. Тулмину и П.Б. Бартону (б); диаграмма T °C – $\log fS_2$ для станинина и сфалерита по М. Шумузи (в). Диаграммы с некоторыми дополнениями заимствованы из работы В.О. Осадчего [21]. а: кривая А отвечает равновесию сфалерит–троилит–железо; кривая В – сфалерит–пирит–пирротин; кривая С – сфалерит–(пирит)–жидкая сера; кривые А и В ограничивают поле сфалерит–пирротин, кривые В и С – поле сфалерит–пирит; темные кружки – точки сфалерита, ассоциирующего с пиритом и пирротином; б – пирротин из ранних (светлые кружки) и поздних (темные кружки) ассоциаций; в – скарновые (темные жирные вытянутые области) и жильные (светлые ромбические вытянутые области) месторождения; толстыми линиями показаны изолинии мольных долей Fe в пирротине, тонкими – в станинне; положение точки (темный кружок) определено по составам станинина и ассоциирующего с ним сфалерита (на пересечении соответствующих изолиний, пояснения см. в тексте)

положению этой точки на рис. 6, в, согласуется с ее фугитивностью для пирротин-пиритовой ассоциации при температуре ~ 320 $^{\circ}\text{C}$ (см. рис. 6, б).

Самородные элементы и интерметаллические соединения

Эта группа представлена самородной сурьмой (с примесью Pb) и самородным серебром (иногда с примесью Cu), а также самородным золотом без примесей или его Pd- и Ag-содержащей разновидностью с небольшим количеством Cu или Pb (табл. 7). Самородные сурьма и серебро наблюдались совместно с кварцем и сульфидами в поздних ассоциациях, а «порпецит» совместно с гидроксидами Mn – в продуктах экзогенного изменения марганцевосиликатных пород.

Заключение

Получены новые данные о химическом составе, ассоциациях и условиях образования спессартина, пирофанита, кобальтина и костибита из марганцевосиликатных пород. Выявлены и изучены группа минералов и минеральных разновидностей, относящихся к числу редких в природе (пироксмангит, мanganокуммингтонит, никелин, зигенит, паркерит), а также ранее неизвестных в Сихотэ-Алине: мanganогрюнерит, кобальтпентландит, кобальтсодержащий (богатый Co) пентландит и соединение $\text{PbBi}_6(\text{Te},\text{S})_9$.

Таблица 7

**Состав самородных элементов и неупорядоченных твердых растворов
благородных металлов, свинца и сурьмы из марганцевосиликатных пород
Мокрушинской площади, мас. %**

№	O	Si	Al	Fe	Mn	Mg	Ca	Cu	Pb	Sb	Ag	Au	Pd	Сумма	Минерал	Формула
1	29,36	18,89	0,36	6,45	21,43	0,72	3,40	1,04	–	–	17,72	–	–	99,37	Серебро	$\text{Ag}_{0,90}\text{Cu}_{0,10}$
2	20,94	10,52	0,94	1,73	4,33	0,42	0,49	–	–	–	61,0	–	–	100,99	Серебро	$\text{Ag}_{1,00}$
3	3,98	–	–	–	8,67	–	–	–	–	–	85,60	–	–	98,75	Золото	$\text{Au}_{1,00}$
4	7,75	3,32	1,53	1,60	14,03	–	2,13	–	–	–	2,52	65,16	1,91	99,95	Золото	$\text{Au}_{0,89}\text{Ag}_{0,06}$ $\text{Pd}_{0,05}$ Wbahs - yb; ybt byltrcs
5	18,62	2,69	1,21	1,98	10,67	0,30	1,53	–	–	–	2,83	56,34	2,80	99,99	Золото	$\text{Au}_{0,82}\text{Pd}_{0,10}$ $\text{Ag}_{0,08}$ Wbahs - yb; ybt byltrcs
6	15,38	1,24	0,58	1,13	8,64	–	2,28	0,64	–	–	5,88	60,69	2,78	100,03	Золото	$\text{Au}_{0,77}\text{Ag}_{0,13}$ $\text{Pd}_{0,07}\text{Cu}_{0,03}$
7	8,25	–	0,48	1,24	8,21	–	1,10	–	–	–	2,60	75,32	2,78	99,98	Золото	$\text{Au}_{0,88}\text{Ag}_{0,06}$ $\text{Pd}_{0,06}$
8	4,51	–	–	0,65	5,27	–	–	–	2,55	–	1,96	87,31	1,80	104,05	Золото	$\text{Au}_{0,90}\text{Ag}_{0,04}$ $\text{Pd}_{0,03}\text{Pb}_{0,03}$
9	2,44	–	–	–	4,03	–	–	–	2,4	–	3,79	86,48	2,55	101,69	Золото	$\text{Au}_{0,86}\text{Ag}_{0,07}$ $\text{Pd}_{0,05}\text{Pb}_{0,02}$
10	9,97	7,59	–	0,71	11,89	–	–	–	3,38	67,06	–	–	–	100,60	Pb–Sb	$\text{Sb}_{0,97}\text{Pb}_{0,03}$

Примечание. Помимо указанных содержатся: в ан. 3 – 0,50 К; 5 – 1,02 Ср. Образцы: М-88-40 (1, 2), М-86-27 (прочие). Прочерк – не обнаружено. «Прихваченные» из-за малых размеров анализировавшихся зерен содержания несвойственных самородным минералам и интерметаллидам элементов не учитывались при расчете формул.

Парагенезисы марганцевосиликатных пород Сихотэ-Алиня и слагающие их породообразующие минералы различаются по составу в зависимости от площади их распространения. На Широкопаддинской площади они относительно богаты Ca и Fe и бедны Mg, на Горной – богаты Mg и бедны Ca и Fe, на Садовой – богаты Ca и бедны Mg и Fe. На Мокрушинской площади ассоциации и минералы богаты Fe и бедны Ca и Mg. Эти особенности отражают различия в химическом составе протолитов марганцевосиликатных пород. Они свидетельствуют о значительных вариациях фациальных условий накопления богатых Mn металлоносных осадков.

Марганцевосиликатные породы сложены разновременными ассоциациями. Наиболее ранние из них образовались при температуре $\sim 500\text{--}550$ °C в результате kontaktового метаморфизма, обусловленного внедрением и становлением Владимира гранитоидного массива, и сложены пироксенOIDами (родонитом и пироксмангитом), спессартином, амфиболами (манганокуммингтонитом и мanganогрюнеритом), пирофанитом и (редко) кварцем. В качестве акцессорных минералов породы содержат соединения Ni и Co, пирит, пирротин, халькопирит, сфалерит и галенит. Более поздние ассоциации формировались при эпизодической циркуляции подвижной флюидной фазы в зонах повышенной проницаемости и трещиноватости на фоне остыивания Владимира массива. Они сложены кварцем, манганокуммингтонитом, мanganогрюнеритом и спессартином, образовались при температуре $\sim 250\text{--}350$ °C и относятся к двум эпизодам гидротермальной деятельности. В качестве акцессорных минералов они содержат самородное серебро, сульфид Ag, пирит, пирротин, сфалерит, галенит, станин и соединение $\text{PbBi}_6(\text{Te},\text{S})_9$. Минералы зоны окисления марганцевосиликатных пород Мокрушинской площади представлены гидроксидами Mn, самородным золотом без примесей или его Pd- и Ag-содержащей разновидностью (с примесью Cu и Pb). Марганцевосиликатные породы Мокрушинской площади и продукты их экзогенного изменения содержат минералы благородных металлов в количествах, которые могут представлять практический интерес.

Полученные новые данные позволяют расширить представления о минералогии Сихотэ-Алиня и дают возможность использования результатов для решения других проблем геологии и металлогенеза Сихотэ-Алиня.

СПИСОК ИСТОЧНИКОВ

1. Волохин Ю.Г., Михайлик Е.В., Бурий Г.И. Триасовая кремневая формация Сихотэ-Алиня. Владивосток: Дальнаука, 2003. 252 с.
2. Казаченко В.Т. Петрология и минералогия гидротермальных марганцевых пород Востока России. Владивосток: Дальнаука, 2002. 250 с.
3. Перевозникова Е.В., Казаченко В.Т. Минералогия спессартин-кварцевых пород Сихотэ-Алиня // Литосфера. 2021. Т. 21, № 1. С. 70–89.
4. Казаченко В.Т., Перевозникова Е.В. Новые данные о минералогии, геохимии и генетических особенностях Белогорского магнетитового месторождения (Сихотэ-Алинь) // Тихоокеанская геология. 2024. Т. 43, № 3. С. 88–108.
5. Калинин А.А., Карпов С.М., Калачева А.Б., Савченко Е.Э. Новые данные по минералогии золотокварцевого месторождения Майского (Северная Карелия) // Труды Ферсмановской научной сессии ГИ КНЦ РАН. 2018. Вып. 15. С. 172–175.
6. Еремин Н.И., Сергеева Н.Е., Дергачев А.Л. Типоморфизм редких минералов колчеданных руд и их геохимический тренд // Вестник Московского университета. Серия 4. Геология. 2007. № 2. С. 40–48.
7. Ozdín D., Uher P., Koděra P. First occurrence of cobaltpentlandite in the Slovak Republic (Ca-Mg skarn, Vysoká-Zlatno) // Bull. mineral.-petrolog. Odd. Nář. Muz. (Praha). 2013. Vol. 21, No. 2. P. 234–239.
8. Бородаев Ю.С., Брызгалов И.А., Мозгова Н.Н., Успенская Т.Ю. Пентландит и кобальтпентландит-типоморфные минералы современных гидротермальных сульфидных построек, связанных с серпентинизированными ультрабазитами (Срединно-Атлантический хребет) // Вестник Московского университета. Серия 4. Геология. 2007. № 2. С. 30–39.

9. Савельев Д.Е. Минералого-geoхимические особенности магнетитовых рудопроявлений в серпентинитах Калканской площади (Зона Главного Уральского разлома, Южный Урал) // Минералогия. 2021. Т. 7, № 3. С. 48–67.

10. Пономаренко А.И., Коваленкер В.А., Тронева Н.В. Паркерит // Труды Минералогического музея АН СССР. 1987. Вып. 34. С. 108–114.

11. Petruk W., Harris D., Stewart J.M. Langisite, a new mineral and the rare minerals cobaltpentlandite, siegenite, parkerite and bravoite from the Langis Mine, Cobalt-Gowganda area, Ontario // Can. Miner. 1969. Vol. 9. P. 597–616.

12. Юргенсон Г.А., Киселева Г.Д., Доломанова-Тополь А.А., Коваленкер В.А., Петров В.А., Абрамова В.Д., Языкова Ю.И., Левицкая Л.А., Трубкин Н.В., Таскаев В.И., Каримова О.В. Строение, минералого-geoхимические особенности и условия образования рудных жил Мо-порфирового месторождения Шахтаминское (Восточное Забайкалье) // Геология рудных месторождений. 2023. Т. 65, № 7. С. 662–699.

13. Горячев Н.А., Гамянин Г.Н., Заякина Н.В. и др. Первая находка сурьмянистого паркерита на Северо-Востоке России // ДАН. 2004. Т. 339, № 6. С. 524–527.

14. Han Y., Yunhua Liu Y., Li W. Mineralogy of Nickel and Cobalt Minerals in Xiarhamu Nickel–Cobalt Deposit, East Kunlun Orogen, China // Frontiers in Earth Science. 2020. Vol. 8. 597469.

15. Степанов В.А., Кунгurova B.E. Сульфидные медно-никелевые месторождения в срединных массивах Пиренейского полуострова и Камчатки // Вестник Северо-Восточного научного центра ДВО РАН. 2021. № 2. С. 17–30.

16. Иващенко В.И., Голубев А.И., Ибрагимов М.М., Ромашкин А.Е. Золотосодержащее оруденение архея Койкарской структуры: генетическая типизация, минеральные ассоциации, условия образования, перспективы // Труды Карельского научного центра РАН. 2014. № 1. С. 39–55

17. Иванов О.К. Зигенит – $(\text{Co}, \text{Ni})_3\text{S}_4$, куб. с. (Siegenite) // Минералогия Урала: Элементы. Карбиды. Сульфиды. Свердловск: УрО АН СССР, 1990. С. 253–254.

18. Ковалев С.Г., Пучков В.Н., Ковалев С.С. Первые находки зигенита $(\text{CoNi}_2\text{S}_4)$ в пикритовых и пикродолеритовых комплексах Южного Урала // ДАН. 2014. Т. 457, № 3. С. 308–314.

19. Воган Д., Крейг Дж. Химия сульфидных минералов / пер. с англ. Н.С. Бортникова, Р.М. Мишелевой; под ред. И.Я. Некрасова. М.: Мир, 1981. 575 с.

20. Гриценко Ю.Д., Спиридовон Э.М. Минералы ряда никелин–брейтгауптит метаморфогенно-гидротермальных жил Норильского рудного поля // Новые данные о минералах. 2005. № 40. С. 51–64.

21. Осадчий В.О. Термодинамические и физические свойства твердого раствора сфалерита / дис. ... канд. геол.-минерал. наук. М., 2018. 114 с.

22. Shimizu Mas., Shimizu Mar., Tsunoda K. Physicochemical Environment of Formation of Tin Sulfide-Bearing Deposits in Japan // Far Eastern Studies. Center for Far Eastern Studies, University of Toyama. 2008. Vol. 7. P. 23–40.

REFERENCES

1. Volokhin Yu.G., Mikhailik E.V., Buriy G.I. Triassic siliceous formation of Sikhote-Alin. Vladivostok: Dal'nauka; 2003. 252 p. (In Russ.).
2. Kazachenko V.T. Petrology and mineralogy of hydrothermal manganese rocks of the East of Russia. Vladivostok: Dal'nauka; 2002. 250 p. (In Russ.).
3. Perevoznikova E.V., Kazachenko V.T. Mineralogy of spessartine-quartz rocks of the Sikhote-Alin. *Lithosphere*. 2021;21(1):70–89. (In Russ.).
4. Kazachenko V.T., Perevoznikova E.V. Geochemistry, mineralogy and genetic features of the Belogorskoe magnetite deposit (Sikhote-Alin). *Russ. J. Pacific Geology*. 2024;43(3):88–108. (In Russ.).
5. Kalinin A.A., Karpov S.M., Kalacheva A.B., Savchenko E.E. New data on mineralogy of the gold quartz deposit of Maisky (North Karelia). *Proceedings of the Fersman Scientific session of the GIKSC RAS*. 2018;15:172–175. (In Russ.).
6. Eremin N.I., Sergeeva N.E., Dergachev A.L. Typomorphism of rare minerals of pyrrhic ores and their geochemical trend. *Moscow University Bulletin. Series 4. Geology*. 2007;(2):40–48. (In Russ.).
7. Ozdín D., Uher P., Koděra P. First occurrence of cobaltpentlandite in the Slovak Republic (Ca-Mg skarn, Vysoká-Zlatno). *Bull. Mineral.-petrolog. Odd. Nář. Muz. (Praha)*. 2013;21(2):234–239.

8. Borodaev Yu.S., Bryzgalov I.A., Mozgova N.N., Uspenskaya T.Yu. Pentlandite and kobaltpentlandite are typomorphic minerals of modern hydrothermal sulfide structures associated with serpentized ultrabasites (Mid-Atlantic Ridge). *Moscow University Bulletin. Series 4. Geology*. 2007;92:30–39. (In Russ.).

9. Savelyev D.E. Mineralogical-geochemical features of magnetite occurrences in serpentinites of the Kalkan area (Main Uralian fault zone, South Urals). *Mineralogy*. 2021;7(3):48–67. (In Russ.).

10. Ponomarenko A.I., Kovalenker V.A., Troneva N.V. Parkerite. *Proceedings of the Mineralogical Museum of the USSR Academy of Sciences*. 1987;34:108–114. (In Russ.).

11. Petruk W., Harris D., Stewart J.M. Langisite, a new mineral and the rare minerals cobaltpentlandite, siegenite, parkerite and bravoite from the Langis Mine, Cobalt-Gowganda area, Ontario. *Can. Miner.* 1969;9:597–616.

12. Yurgenson G.A., Kiseleva G.D., Dolomanova-Topol A.A., Kovalenker V.A., Petrov V.A., Abramova V.D., Yazykova Yu.I., Levitskaya L.A., Trubkin N.V., Taskaev V.I., Karimova O.V. Structure, mineralogical and geochemical features and conditions of ore vein formation of the Shakhtaminskoye porphyry deposit (Eastern Transbaikalia). *Geology of Ore Deposits*. 2023;65(7):662–699. (In Russ.).

13. Goryachev N.A. Gamyanin G.N., Zayakina N.V. The first discovery of antimony parkerite in the North-East of Russia. *Proceedings of the Academy of Sciences*. 2004;339(6):524–527. (In Russ.).

14. Han Y., Yunhua Liu Y., Li W. Mineralogy of Nickel and Cobalt Minerals in Xirihamu Nickel–Cobalt Deposit, East Kunlun Orogen, China. *Frontiers in Earth Science*. 2020;8. 597469.

15. Stepanov V.A., Kungurova V.E. Sulfide copper-nickel deposits in middle massifs of the Pyrenean Peninsula and Kamchatka Peninsula. *Bulletin of the North-East Scientific Center of the Far Eastern Branch of the Russian Academy of Sciences*. 2021;(2):17–30. (In Russ.).

16. Ivashchenko V.I., Golubev A.I., Ibragimov M.M., Romashkin A.E. Archean auriferous mineralization of the Koikary structure: genetic typification, mineral assemblages, formation conditions, and perspectives. *Proceedings of the Karelian Scientific Center of the Russian Academy of Sciences*. 2014;(1):39–55. (In Russ.).

17. Ivanov O.K. Ziegenite – $(Co, Ni)_3S_4$, cubic With. (Siegenite). In: *Mineralogy of the Urals: Elements. Carbides. Sulfides*. Sverdlovsk: Ural Branch of the USSR Academy of Sciences; 1990. P. 253–254. (In Russ.).

18. Kovalev C.G., Puchkov V.N., Kovalev S.S. The first finds of zygenium ($CoNi_2S_4$) in picrite and picrodolerite complexes of the Southern Urals. *Proceedings of the Academy of Sciences*. 2014;457(3):308–314. (In Russ.).

19. Vaughan D., Craig J. Mineral chemistry of metal sulfides. Moscow: Mir; 1981. 575 p. (In Russ.).

20. Gritsenko Yu.D., Spiridonov E.M. Minerals of a number of nickel-breithauptite metamorphogenic hydrothermal veins of the Norilsk ore field. *New Data on Minerals*. 2005;40:51–64. (In Russ.).

21. Osadchy V.O. Thermodynamic and physical properties of a solid solution of sphalerite. Dissertation for the degree of Candidate of Geological and Mineralogical Sciences. Moscow; 2018. 114 p. (In Russ.).

22. Shimizu Mas., Shimizu Mar., Tsunoda K. Physicochemical Environment of Formation of Tin Sulfide-Bearing Deposits in Japan. *Far Eastern Studies*. Center for Far Eastern Studies, University of Toyama. 2008;7:23–40.

НАУКИ О ЗЕМЛЕ
И ОКРУЖАЮЩЕЙ СРЕДЕ

Обзорная статья

УДК 553.493.57:553.04:571.6

DOI: 10.7868/S3034530825050039

Ресурсы и добыча германия на Дальнем Востоке России: современное состояние, проблемы и перспективы

И.Ю. Чекрыжов, И.А. Тарасенко, С.И. Арбузов, Н.Ю. Попов[✉]

Игорь Юрьевич Чекрыжов

научный сотрудник

Дальневосточный геологический институт ДВО РАН, Владивосток, Россия

chekr2004@mail.ru

<https://orcid.org/0000-0002-0319-8759>

Ирина Андреевна Тарасенко

доктор геолого-минералогических наук, ведущий научный сотрудник

Дальневосточный геологический институт ДВО РАН, Владивосток, Россия

профессор

Дальневосточный федеральный университет, Владивосток, Россия

tarasenko_irina@mail.ru

<https://orcid.org/0000-0002-4612-0708>

Сергей Иванович Арбузов

доктор геолого-минералогических наук, ведущий научный сотрудник

Дальневосточный геологический институт ДВО РАН, Владивосток, Россия

профессор

Национальный исследовательский Томский политехнический университет, Томск, Россия

siarbuzov@mail.ru

<https://orcid.org/0000-0001-6378-4103>

Никита Юрьевич Попов

младший научный сотрудник

Дальневосточный геологический институт ДВО РАН, Владивосток, Россия

porov_ni22@mail.ru

<https://orcid.org/0000-0002-3401-2849>

Аннотация. В работе представлен обзор ресурсного потенциала германия на территории Дальнего Востока России с акцентом на Приморский край. Германий как стратегически важный редкий элемент используется в высокотехнологичных отраслях – от инфракрасной оптики до солнечной энергетики. Основным источником германия в России являются бурые угли, также германий добывают попутно при переработке руд цветных металлов. Приморский край представлен четырьмя германий-угольными месторождениями: Павловским, Раковским, Шкотовским и Бикинским – и рядом проявлений. Павловское месторождение – единственный в России объект с промышленной добычей германия (до 2018 г.), обеспечивавший более 70% внутреннего производства. Остальные месторождения пока не разрабатываются, но обладают значительными разведанными запасами или прогнозными

ресурсами. В Дальневосточном регионе кроме Приморья перспективные объекты находятся на Сахалине (Новиковское месторождение), в Забайкальском крае (Тарбагатайское) и в Бурятии (Эландинское, Озерное), а также Кунаревская площадь в Магаданской области. Работа включает характеристику геохимических особенностей концентрирования германия в углях, технологические аспекты извлечения, обзор действующих и законсервированных проектов, а также обзор данных по основным типам месторождений. Выводы подчеркивают важность ресурсной базы Дальнего Востока для наращивания отечественного производства германия и снижения импортной зависимости при условии модернизации технологий и привлечения инвестиций.

Ключевые слова: германий, германий-угольные месторождения, ресурсный потенциал, технологии извлечения, Дальний Восток

Для цитирования: Чекрыжов И.Ю., Тарасенко И.А., Арбузов С.И., Попов Н.Ю. Ресурсы и добыча германия на Дальнем Востоке России: современное состояние, проблемы и перспективы // Вестн. ДВО РАН. 2025. № 5. С. 41–52. <http://dx.doi.org/10.7868/S3034530825050039>

Финансирование. Работа выполнена в рамках государственного задания Минобрнауки России для ДВГИ ДВО РАН.

Review article

Germanium resources and production in the Russian Far East: current status, problems and prospects

I.Yu. Chekryzhov, I.A. Tarasenko, S.I. Arbuzov, N.Yu. Popov

Igor Yu. Chekryzhov

Researcher

Far East Geological Institute, FEB RAS, Vladivostok, Russia

chekr2004@mail.ru,

<http://orcid.org/0000-0002-0319-8759>

Irina A. Tarasenko

Doctor of Sciences in Geology and Mineralogy, Leading Researcher

Far East Geological Institute, FEB RAS, Vladivostok, Russia

Professor

Far Eastern Federal University, Vladivostok, Russia

tarasenko_irina@mail.ru

<http://orcid.org/0000-0002-4612-0708>

Sergey I. Arbuzov

Doctor of Sciences in Geology and Mineralogy, Leading Researcher

Far East Geological Institute, FEB RAS, Vladivostok, Russia

Professor

National Research Tomsk Polytechnic University, Tomsk, Russia

siarbuzov@mail.ru

<http://orcid.org/0000-0001-6378-4103>

Nikita Yu. Popov

Junior Researcher

Far East Geological Institute, FEB RAS, Vladivostok, Russia

popov_ni22@mail.ru

<http://orcid.org/0000-0002-3401-2849>

Abstract. The paper presents an overview of the resource potential of germanium in the Russian Far East with an emphasis on Primorsky Territory. Germanium, as a strategically important rare element, is used in high-tech industries – from infrared optics to solar energy. The main source of germanium in Russia is brown coal, germanium is also mined as a by-product during the processing of polymetallic ores. Primorsky Territory is represented by four germanium-coal deposits: Pavlovskoye, Rakovskoye, Shkotovskoye and Bikinskoye and a number of occurrences. The Pavlovskoye deposit is the only object in Russia with industrial production of germanium (until 2018), providing more than 70% of domestic production. The remaining deposits are not yet being developed, but have significant explored reserves or predicted resources. In the Far East region, in addition to Primorye, promising sites are located on Sakhalin (Novikovskoye deposit) in the Zabaikalsky Territory (Tarbagataiskoye) and in Buryatia (Elandinskoye, Ozernoye), as well as the Kunarevskaya area in the Magadan Region. The work includes a description of the geochemical features of germanium concentration in coals, technological aspects of extraction, a review of existing and mothballed projects, as well as a review of data on the main types of deposits. The conclusions emphasize the importance of the Far East resource base for increasing domestic germanium production and reducing import dependence, subject to technology modernization and investment attraction.

Keywords: germanium, germanium-coal deposits, resource potential, extraction technologies, Far East

For citation: Chekryzhov I.Yu., Tarasenko I.A., Arbuzov S.I., Popov N.Yu. Germanium resources and production in the Russian Far East: current state, problems and prospects. *Vestnik of the FEB RAS*. 2025;(5):41–52. (In Russ.). <http://dx.doi.org/10.7868/S3034530825050039>

Funding. The work was carried out within the framework of the state assignment of the Ministry of Science and Higher Education of the Russian Federation for the Far East Geological Institute, FEB RAS.

Введение

Германий (Ge) – это редкий полуметалл (атомный номер 32), обладающий свойствами полупроводника. Его ключевая ценность связана с уникальными оптическими, полупроводниковыми и катализитическими свойствами. Германий используется в высокотехнологичных областях, где он востребован в электронных приборах и солнечных преобразователях, а также в Si–Ge-соединениях. $GeCl_4$ используется как компонент для получения стекла в оптоволоконной технике. GeO_2 с чистотой до 99,999% применяется в катализаторах для полимеризации PET-пластмасс, а особо чистый – в производстве кристаллов BGO ($Bi_{14}Ge_3O_{12}$) сцинтилляционных датчиков фотонов высоких энергий, а также в приборах ночного видения [1, 2]. Эти сферы применения делают германий стратегическим сырьем, несмотря на его относительно небольшой ежегодный рынок в нашей стране. Германий – рассеянный элемент, не образующий крупных самостоятельных рудных скоплений. В природе он образует промышленные концентрации в углях и извлекается как попутный элемент из некоторых типов руд.

Важнейшие источники германия

Угольные месторождения. Германий способен накапливаться в торфяниках, формируя германий-угольные месторождения, преимущественно в маломощных пластах бурого угля. Восстановительная обстановка торфяников способствует концентрированию Ge за счет сорбции соединений Ge органическим веществом. В таких германиеносных углях германий обычно связан с органической матрицей угля или тонкодисперсными минералами в углях и углистых породах [3–5]. Концентрации германия в германиеносных углях часто аномально высоки: средние содержания в угольных пластах Приморья достигают 20–1500 г/т, а максимальные – до 5500 г/т, что в тысячи раз превышает кларк элемента. Такие угли рассматриваются как комплексное сырье, часто содержащее помимо германия сопутствующие редкие элементы (вольфрам, бериллий, сурьму, галлий, редкоземельные элементы (РЗЭ) и др.) [4, 6–10]. Относительно источника германия и сопутствующих ему элементов в углях существуют две основные модели. Первая модель, обоснованная на первом этапе изучения Павловского месторождения, получила

название гипергенной [11, 12]. Вторая модель появилась несколько позднее и названа гидротермально-осадочной, экспаляционно-осадочной или экспфильтрационной [4, 7–8, 13]. Недавно на большом фактическом материале была обоснована предложенная ранее гипергенная (инфильтрационная) модель формирования месторождения Спецугли и аналогичных германий-угольных объектов [5, 10].

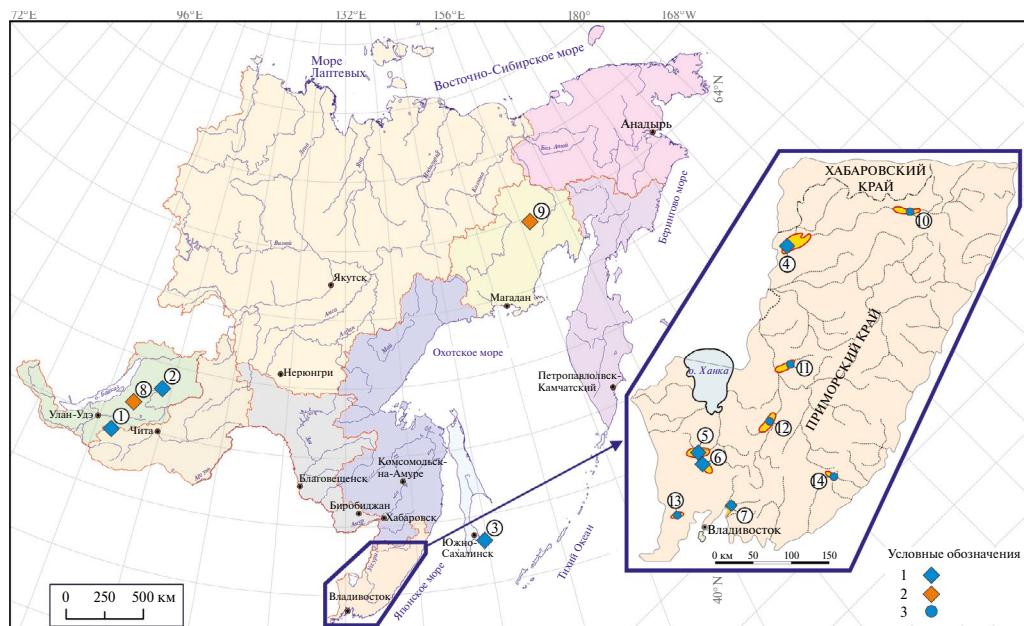
Сульфидные руды. Германий изоморфно входит в кристаллическую решетку сульфидов, главным образом сфалерита (ZnS). В полиметаллических месторождениях цинка и свинца концентрации Ge в сфалерите могут достигать сотен грамм на тонну. Кроме того, известны редкие минералы германия – германит $Cu_{26}Fe_4Ge_4S_{32}$, реньерит $(Cu, Zn)_{11}(Ge, As)_2Fe_4S_{16}$ и др., образующиеся в медно-полиметаллических рудах. Встречается германий и в некоторых серебряных минералах (агриродит Ag_8GeS_6). Однако собственно германиевые рудные проявления очень редки, и добыча обычно ведется попутно при переработке основных металлов. Например, значительная часть мирового германия получается как побочный продукт при выплавке цинка из концентратов, обогащенных Ge. До последнего времени вторым по значимости после германий-угольных месторождений источником его промышленного получения были медно-полиметаллические месторождения Цумеб и Кипуши Южной и Центральной Африки. В настоящее время эти месторождения практически отработаны и законсервированы [14]. Германий здесь представлен собственными минералами германитом и реньеритом, а также в виде примеси в сфалерите.

Другие источники. Германий установлен в повышенных концентрациях в некоторых окисленных Fe–Mn- и Cu–Mo–Au-рудах и бокситах в виде адсорбированных соединений, а также в продуктах вулканической деятельности (горячие источники могут содержать растворенный Ge) [1]. Однако большинство из них не используются по экономическим причинам. Небольшое количество германия получают из отходов производства и путем вторичной переработки изделий, содержащих германий. Тем не менее в настоящее время главными промышленными его источниками в мире остаются угли и полиметаллические (преимущественно цинковые) концентраты.

Германиевые месторождения Приморского края

Приморье – основной регион России, где обнаружены уникально богатые германием угли. В настоящее время в Приморском крае известно четыре германий-угольных месторождения с промышленными содержаниями Ge и подсчитанными запасами и ресурсами: **Павловское, Шкотовское, Бикинское и Раковское** [15]. Государственным балансом запасов рассеянных элементов по состоянию на 01.01.2024 г. учтены первые три месторождения [16]. Аналогов по содержаниям германия этим месторождениям в России нет [4, 8]. Они расположены в разных районах края (см. рисунок) и приурочены к кайнозойским угленосным впадинам. Ниже приведены краткие сведения о каждом из них.

Павловское месторождение (участок Спецугли), Михайловский район. Это наиболее изученное германий-угольное месторождение в Приморье. Угли – бурые (марки 2Б), мощность пластов до 10 м (мощность германиеносных пластов 0,6–4,1 м), зольность – умеренная. По данным Государственного баланса на 01.01.2024 г. [16], запасы германийсодержащего сырья для открытой добычи составляют: категории А + В + С₁ – 3166 тыс. т угля, со средним содержанием Ge 166,11 г/т (итого ≈525,9 т Ge); дополнительно С₂ – 82 тыс. т (8,8 т Ge). Балансовые запасы в углистых породах по категории А + В + С₁ – 1524 тыс. т, со средним содержанием Ge 228,81 г/т (итого ≈348,7 т Ge). Кроме того, учтены значительные забалансовые ресурсы – 4990 тыс. т руды и ≈43,5 т Ge. Месторождение Спецугли в контуре карьера находится в распределенном фонде недр (недропользователь – ООО «Германий и приложения»). Максимальные содержания Ge сосредоточены в углях и углистых прослоях и достигают 0,3–0,4% (до 3460 г/т). Угли насыщены также другими ценными элементами-примесями – иттрием, лантаноидами, сурьмой, вольфрамом и др. [4, 9–10, 15], что делает месторождение комплексным. В углях месторождения Спецугли германий присутствует в различных формах. Считается, что основная часть германия связана с гуминовыми кислотами (германийорганическая форма) [4]; минеральные формы представлены алюмосиликатными (силикатными) выделениями с германием, а также разнообразными



Расположение основных германиевых месторождений и проявлений (цифры в кружках). Условные обозначения: 1 – месторождения в углях: Тарбагатайское (1), Эландинское (2), Новиковское (3), Нижнебикинское (Бикинское) (4), Павловское (участок Спецугли) (5), Раковское (6), Шкотовское (7); 2 – месторождения полиметаллических руд с германием: Озерное (8); 3 – проявления германия в углях: Верхнебикинское (10), Крыловское (11), Чернышевское (12), Амбинское (13), Чернокаменское (Ванчинское) (14)

германийсодержащими железистыми (гидрогетит, гетит, ярозит) и полиминеральными фазами [5].

Для извлечения германия применялась следующая схема: уголь сжигался в смеси с породой в котельной с последующим улавливанием золы уноса, а затем летучая зола-концентрат отправлялась на завод для получения металлического германия. Однако, согласно последним опубликованным данным, в результате промышленной отработки германиеносных углей месторождения Спецугли в 2017 г. по традиционной технологии, включающей стадию получения обогащенной металлом летучей золы, коэффициент извлечения составил всего 28,74% [17]. Соответственно, технологические потери германия при сжигании угля составили 71,26%, в том числе со шлаками – 67,13% [5], что ставит вопрос по изменению применяемой технологической схемы.

По данным надзорных органов, в 2017 г. на участке было добыто $\approx 1,45$ т германия (за полугодие) [18], однако в 2018 г. добыча прекратилась. Причины – экономические трудности и износ оборудования. Тем не менее месторождение остается наиболее подготовленным к освоению при благоприятной конъюнктуре рынка.

Раковское месторождение, Михайловский район. Находится в одноименной впадине возле г. Уссурийска. Угли бурые, мощность пластов 1–5 м, среднезольные, служат энергетическим топливом. Германий концентрируется в углистых сланцах, прослоях угля. Угли месторождения также аномально обогащены ураном вплоть до формирования собственного месторождения [19], некоторые пласты содержат промышленные концентрации РЗЭ. Прогнозные ресурсы германия оценены в 600 т [15]. По оценкам, среднее содержание Ge порядка десятков граммов на тонну, максимальные – несколько сот граммов на тонну. Месторождение разрабатывалось как обычное буроугольное: в 2009 г. добыто ≈ 379 тыс. т угля, в 2010 г. – 341 тыс. т [20]. В 2016 г. лицензия на Раковское месторождение приобретена АО «Приморскуголь», планировалось комплексное

освоение с извлечением германия из угля. Однако к настоящему времени промышленного извлечения Ge не ведется, добыча угля также прекращена. Государственным балансом месторождение не учитывается.

Шкотовское месторождение, Шкотовский район. Германиеносные угли залегают в отложениях кайнозойской Шкотовской впадины недалеко от побережья Уссурийского залива. Аномальные содержания германия обнаружены в верхних гумусовых угольных пластах и сопутствующих породах. Состояние запасов на 01.01.2024 г. [16] по участку Южный оцениваются по категории C_2 для бурых углей – 1383 тыс. т при среднем содержании германия 610,41 г/т, что дает 844,2 т Ge. Для германийодержащих углей запасы оценены по категории C_2 – 1274 тыс. т при среднем содержании 589,56 г/т, всего 751,1 т Ge. Балансовые запасы углистых пород оценены по категории C_2 – 109 тыс. т и 93,1 т Ge. По более ранним данным, среднее содержание Ge в германиеносных пластах колеблется от 410 до 1400 г/т, а в отдельных превышает 3000 г/т, ресурсы германия – 800 т [15].

Месторождение находится в нераспределенном фонде и законсервировано, добыча топлива не ведется из-за удаленности от энергетических объектов и сложного рельефа. Германийодержащие угли Шкотовского месторождения рассматриваются как перспективное сырье в будущем. Для его освоения потребуются значительные инвестиции и создание обогатительных мощностей для извлечения германия.

Бикинское месторождение, Пожарский район. Расположено на севере Приморья, в бассейне р. Бикин близ пос. Лучегорска. Угли бурые, в основном энергетические, залегают в кайнозойских отложениях Нижнебикинской впадины. Балансовые запасы угля крупные (сотни миллионов тонн). Германий сконцентрирован в угле и в углистых породах на отдельных участках в центральной части впадины. Кроме германия в углях и углистых аргиллитах установлены повышенные концентрации вольфрама, бериллия, сурьмы, цинка, галлия и серебра. Бикинское месторождение (в пределах оконтуренных германиеносных участков Федосьевский и Черемшовский) содержит значительные прогнозные ресурсы Ge ≈ 2800 т при средних содержаниях в рудоносных пластах от 0,011 до 0,059% Ge [15]. Согласно Госбалансу [16], на территории Бикинского буруугольного месторождения (участок Черемшовский) балансовые запасы на 01.01.2024 г. по категории C_1 – 2162 тыс. т германийодержащих углей при среднем содержании ≈ 83,26 г/т Ge (всего ≈ 180 т). Месторождение активно эксплуатируется как топливное, его ведет АО «Лучегорский угольный разрез» (входит в СУЭК). Ежегодная добыча угля достигает ≈ 4 млн т, весь уголь используется на Приморской ГРЭС (крупнейшей тепловой электростанции Дальнего Востока). На данный момент месторождение находится в нераспределенном фонде, добыча германиеносных углей и целевого извлечения германия из бикинского угля не производится.

Помимо указанных четырех месторождений в Приморье известны и мелкие проявления германия, связанные с углями (см. рисунок). Однако содержания и запасы Ge там невелики, и промышленного значения они не имеют. Основной потенциал сосредоточен именно в Павловском, Раковском, Шкотовском и Бикинском месторождениях.

Месторождения и проявления в других регионах Дальнего Востока

За пределами Приморья значимые германиевые объекты на Дальнем Востоке немногочисленны.

Сахалинская область, Новиковское месторождение. Расположено на Тонино-Анивском полуострове (юг Сахалина, Корсаковский район). Представляет собой германиеносное буруугольное месторождение, сходное по генезису с приморскими. Освоение велось еще в советское время: в 1960–1970-х годах добывались угли и сопутствующие углистые аргиллиты, из которых извлекали германий. К концу 1980-х гг. разрез был закрыт, оставшиеся запасы законсервированы. По данным Госбаланса [16], остаточные балансовые запасы германийодержащих пород для открытой добычи на Новиковском месторождении составляют 81,9 т Ge (353 тыс. т породы), из них на германийодержащий уголь приходится ≈ 38,9 т Ge (среднее содержание ≈ 182,63 г/т), а на углистые аргиллиты ≈ 43,0 т Ge (307 г/т). Помимо этого, значительные

ресурсы германия ($\approx 547,6$ т) находятся глубже карьера и учтены как забалансовые (для подземной добычи). Таким образом, Новиковское – крупное месторождение (суммарно свыше 600 т Ge), хотя доступно открытым способом лишь ≈ 82 т. В настоящее время добыча угля не ведется, карьер затоплен. Месторождение находится в нераспределенном фонде. В перспективе возможно возобновление работ при применении подземного выщелачивания или иных технологий либо разработка оставшихся небольших участков открытым способом. В целом же Сахалин остается ценным резервом германиевого сырья в РФ.

Забайкальский край. Здесь находится *Тарбагатайское месторождение германия*, оконтуренное в пределах одноименного месторождения бурого угля. Германиеносные угли в пределах месторождения известны с середины XX века. С 1964 по 1994 г. угли в северо-восточной части месторождения с содержанием германия 120–130 г/т отрабатывались с получением промышленного концентраты в золе уноса. Промышленная германиеносность приурочена к северо-восточной части месторождения. Здесь оконтурено 3 участка с промышленным содержанием германия. На отдельных участках в угольных пластах Тигнинский, Спутник и Мощный установлены аномальные концентрации W, Mo, Be, Ge и РЗЭ [21]. Один участок (Тигнинский) отработан. Два другие, Новый и Зугмарский, перспективны для освоения. Суммарные ресурсы германия здесь превышают 710 т, из них разведанные запасы промышленных категорий – 380 т [21]. По состоянию на 01.01.2024 г. на Тарбагатайском месторождении (участок Новый) для открытой отработки доступны балансовые запасы германийсодержащего угля по категории А + В + С₁ – 5256 тыс. т, с запасами Ge 280,8 т; для категории С₂ – 2241 тыс. т и 97,8 т Ge. Участок находится в нераспределенном фонде [16].

Республика Бурятия, Эландинское месторождение. Это крупное германиеносное буругоильное месторождение, расположенное в Баунтовском районе Бурятии (бассейн руч. Кулоруш). По составу и времени формирования близко к дальневосточным месторождениям. Балансовые запасы бурого угля (категории А + В + С₁) оцениваются почти в 14 млн т [22]. Содержание германия в углях невысокое (десятки граммов на тонну), но за счет больших объемов угля общие запасы Ge значительны. Разведкой (1960-е годы) на Эландинском месторождении учтено 165 т Ge (категория С₁). Однако условия развития сложные – район труднодоступен, многолетняя мерзлота, заболоченность. Месторождение детально разведано и считается подготовленным для промышленного освоения [22], но на практике не разрабатывается из-за отсутствия инфраструктуры. Эландинское – стратегический резерв германия для России; его освоение возможно в будущем, при создании гидрометаллургического комплекса (например, выщелачивания германия из угля). Государственным балансом не учитывается.

Также в крупных месторождениях цинка и свинца Бурятии (например, *Озерное* и *Ходнинское*) сфалерит содержит повышенные концентрации Ge. В месторождении Озерное по категории Р₁ учтено 508 т Ge [23]. Тем не менее специализированная добыча германия там не осуществляется. Государственным балансом не учитывается.

Магаданская область, Кунаревская площадь. Перспективная площадь в Верхнем Приколымье (Среднеканский район), где в составе железомарганцевых метасоматитов отмечено аномальное содержание германия (в минералах ильвайт, гранат и др. до 0,1% Ge) [24]. По оценке геологов, прогнозные ресурсы германия там велики – до 6000 т (категория Р₃), однако это весьма предварительные данные. Объект находится в стадии геологоразведки, до стадии месторождения он не доработан. Если подтвердятся оценки, Кунаревская площадь могла бы стать источником германия из скарновых железных руд.

Таким образом, помимо Приморья в Дальневосточном федеральном округе реально промышленно значимы только германий-угольные месторождения Новиковское на Сахалине и Тарбагатайское в Забайкалье. Остальные регионы (Якутия, Хабаровский край, Амурская область и др.) практически не имеют ресурсов Ge. Главная же ресурсная база германия в РФ сосредоточена именно в Дальневосточном регионе (Приморье, Сахалин, Забайкалье) (см. таблицу). Общий ресурсный потенциал германия только в Приморском крае оценивался В.В. Серединным в 6–7 тыс. т [8]. Позднее В.И. Вялов с соавторами обосновали прирост прогнозных ресурсов германия в углях изученных ими месторождений Приморья еще в 2 тыс. т [9].

Основные месторождения германия на Дальнем Востоке России

Месторождение	Регион (район)	Тип сырья	Балансовые запасы и ресурсы Ge, т	Ср. содержание Ge, г/т	Стадия освоения / добыча
Павловское (участок Спецугли)	Приморский край (Михайловский)	Бурый уголь	874,6 (A + B + C ₁), 8,8 (C ₂) [16]	186,48 (до 3000)	Промышленно разведано; велась добыча (≈1,4 т Ge в 2017 г.) [18], приостановлена 2018 г.
Раковское	Приморский край (Уссурийский)	Бурый уголь	Ресурсы ≈600 [15]	≈20–100 (макс. 600)	Добывался уголь (до 0,3 млн т/год) [20]; Ge не извлекался (резерв)
Шкотовское	Приморский край (Шкотовский)	Бурый уголь	844,2 (C ₂) [16] Ресурсы ≈800 [15]	610,41 ≈410–1400 (макс. >3000)	Крупные запасы угля (487 млн т) [16]; не разрабатывается (резерв)
Бикинское	Приморский край (Пожарский)	Бурый уголь	180 (C ₂) [16] Ресурсы ≈2800 [15]	83,26 ≈150–200 (макс. 2000)	Данные из Государственного баланса для участка Черемшовский. Действующий разрез (≈4 млн т угля/год); целевое извлечение Ge не ведется
Новиковское	Сахалинская обл. (Корсаковский)	Бурый уголь, аргиллит	81,9 (открытые работы); +547,6 забаланс. (подземные) [16]	81,9 в угле; 307 в аргиллите	Разрабатывалось (1960–1980-е гг.), законсервировано; возможно возобновление. Перспективное
Эландинское	Республика Бурятия (Баунтовский)	Бурый уголь	165 (C ₁) [22]	30–120	Разведано (1960-е гг.), готово к освоению [22]; не разрабатывается (труднодоступно). Перспективное
Тарбагатайское	Забайкальский край, (Петровск-Забайкальский)	Бурый уголь	280,8 (A + B + C ₁). 97,8 (C ₂) 410,1 (забаланс.) [16] 330 – запасы, 380 – ресурсы [21]	53,2 ≈80	Разрабатывалось, возможно возобновление
Кунаревская площадь	Магаданская обл.	Fe–Mn-скарны	≈6000 (P ₃) [24]	≈50–100 (в рудах)	Перспективная площадь, требуется разведка
Озерное	Республика Бурятия	Pb–Zn	508 (P ₁) [23]	Нет данных	Действующее предприятие ГОК «Озерный». Добыча германия не ведется

Примечания. Приведены данные официальной геолого-резервной оценки на 01.01.2024 г. (Госбаланс) или оценки, опубликованные в научных работах. Для прогнозных ресурсов (Р-категории) значения ориентировочные.

Добыча германия в России: современное состояние, проблемы и перспективы

В последние десятилетия добыча германия в России носила ограниченный характер. Основной объем производства его приходился на Павловское месторождение (Приморье), где работало предприятие ООО «Германий и приложения». Здесь была выстроена технологическая цепочка: сжигание угля на Дальнем Востоке с получением концентрата GeO_2 , затем переработка концентрата в чистый металл в Сибири. Эта интегрированная схема позволила в 2016–2017 гг. достичь добычи ≈ 3 т германия в год. Однако к 2018 г. проект столкнулся с трудностями – изношенностю оборудования, снижением рентабельности из-за волатильности цен на германий, а также проблемами с логистикой [18].

В 2018 г. в пос. Новошахтинском был построен и запущен новый завод по извлечению германия по улучшенной технологии из углей Павловского месторождения, но в настоящее время он не работает, добыча германиеносных углей не ведется.

В последние годы российские потребности в германии частично покрываются за счет импорта высокочистого германия из Китая (китайские компании контролируют значительную часть рынка). В стране функционируют перерабатывающие мощности (АО «Германий» концерна «Ростех» и др.), но они в основном работают на импортном сырье.

Проблемы освоения германиевых месторождений на Дальнем Востоке включают:

- сложность и энергоемкость технологий извлечения (необходимо сжигать или выше-лачивать огромные массы низкосортного угля для получения килограммов германия), КПД извлечения часто оставляет желать лучшего;
- отдаленность месторождений и слаборазвитая инфраструктура: перевозка угля или концентрата на большие расстояния увеличивает себестоимость;
- экологические риски: германийсодержащие угли часто обогащены токсичными элементами (например, бериллием, сурьмой, мышьяком) [4, 8, 15], что требует особых мер при переработке, чтобы избежать загрязнения почв и вод;
- рынок германия невелик и подвержен конъюнктурным колебаниям, инвесторы с осторожностью относятся к проектам, окупаемость которых зависит от цен на металл.

В то же время имеются и перспективы: мировой спрос на германий растет благодаря развитию фотоники, ИК-оптики, возобновляемой энергетики. Цены на металлы в 2021–2023 гг. повышались, стимулируя интерес к добыче. В Приморье возобновлены поисково-разведочные работы – изучаются новые участки вокруг известных месторождений, поскольку выявление богатых участков угля может значительно улучшить экономику проектов. Государство рассматривает германий как стратегически важный элемент; возможны меры поддержки, например налоговые льготы для горно-добывающих предприятий.

Технологические улучшения – ключ к успешному развитию отрасли. Так, в Китае (основном производителе германия в мире) производство германия из углей активно развивается. Полная технологическая цепочка переработки германиеносных углей до высокочистого монокристаллического германия была описана В.В. Серединым на примере фабричного комплекса, расположенного на китайском месторождении Улантуга (Вулантуга), еще в 2012 г. [25]. В последние годы, в связи с ростом спроса и цены на германий, увеличился и научный интерес к данной проблеме. Вышел ряд обобщений, касающихся технологий получения германия из различных видов сырья, включая инновационные наработки по технологиям извлечения германия, которые позволят повысить коэффициент извлечения и задействовать новые источники [26–29]. Перспективна переработка отходов транзисторов, солнечных панелей и оптоволоконной техники. Внедрение инновационных методов экстрагирования германия из углей или золы (например, с применением различных растворителей или бактерий) позволит извлекать металл выборочно из крупных массивов германийсодержащих углей и золоотвалов. Также разрабатываются мембранные и сорбционные технологии улавливания Ge из дымовых газов ТЭЦ. Их установка на ГРЭС, сжигающих угли с повышенными содержаниями германия, в перспективе могла бы ежегодно давать десятки килограммов германия практически без дополнительных топливных затрат.

Заключение

Таким образом, современное состояние добычи и переработки германиевых руд с получением чистого германия в РФ остается скромным, но геологическая база (прежде всего ресурсы Приморья, Забайкалья и Сахалина) предоставляет широкие возможности для наращивания производства. Решение технических и экономических (может быть, инфраструктурных) проблем позволит России снизить импортную зависимость по этому редкому элементу. Учитывая стратегическое значение германия для электроники и оптики, развитие его добычи на Дальнем Востоке – перспективное направление, способное оживить горнодобывающий сектор региона. Все перечисленные объекты подтверждают, что Дальний Восток России – основная кладовая германия в стране, и дальнейшее изучение и освоение этих месторождений может создать основу для возрождения отечественного промышленного производства этого стратегического элемента.

СПИСОК ИСТОЧНИКОВ

1. Höll R., Kling M., Schroll E. Metallogenesis of germanium – a review // Ore Geology Reviews. 2007. Vol. 30, No. 3. P. 145–180. <https://doi.org/10.1016/j.oregeorev.2005.07.034>
2. Наумов А.В. Мировой рынок германия и его перспективы // Известия вузов. Цветная металлургия. 2007. № 4. С. 32–40.
3. Шпирт М.Я. Формы соединений микроэлементов и их превращения при переработке твердых горючих ископаемых // Химия твердого топлива. 2004. № 6. С. 62–84.
4. Середин В.В. Месторождения германия // Крупные и суперкрупные рудные месторождения: В 3 т. Т. 3, Кн. 2 / под ред. Н.П. Лаверова, Д.В. Рундквиста. М.: ИГЕМ РАН, 2006. С. 707–736.
5. Арбузов С.И., Ильенок С.С., Чекрыжов И.Ю. Формы нахождения германия и вольфрама в германий-угольном месторождении Спецугли (Дальний Восток) // Известия Томского политехнического университета. Инжиниринг георесурсов. 2020. Т. 331, № 11. С. 60–77.
6. Иванов В.В., Кац А.Я., Костин Ю.П., Мейтов Е.С., Соловьев Е.Б. Промышленные типы природных концентраций германия. М.: Недра, 1984. 246 с.
7. Левицкий В.В., Седых А.К., Ульмясбаев Ш.Г. Германий-угольные месторождения Приморья // Отечественная геология. 1994. № 7. С. 63–66.
8. Середин В.В. Металлоносность углей: условия формирования и перспективы освоения // Угольная база России. М.: Геоинформмарк, 2004. Т. 6. С. 453–519.
9. Вялов В.И., Кузеванова Е.В., Нелюбов П.А. и др. Редкometалльно-угольные месторождения Приморья // Разведка и охрана недр. 2010. № 12. С. 53–57.
10. Arbuзов S.I., Chekryzhov I.Yu., Spears A., Ilenok S.S., Soktoev B.R., Popov N.Yu. Geology, geochemistry, mineralogy and genesis of the Spetsugli high-germanium coal deposit in the Pavlovsk coalfield, Russian Far East // Ore Geology Reviews. 2021. Vol. 139, Pt 5. 104537. <https://doi.org/10.1016/j.oregeorev.2021.104537>
11. Сапрыкин Ф.Я. Месторождения германия // Рудные месторождения СССР. В 3 т. Т. 3 / под ред. В.И. Смирнова. 2-е изд., перераб. и доп. М.: Недра, 1978. С. 464–471.
12. Вялов В.И., Ларичев А.И., Кузеванова Е.В., Богомолов А.Х., Гамов М.И. Редкие металлы в буроугольных месторождениях Приморья и их ресурсный потенциал // Региональная геология и металлогения. 2012. № 51. С. 96–105.
13. Костин Ю.П., Мейтов Е.С. К генезису месторождений высокогерманиеносных углей и критериям их поисков // Известия АН СССР. Серия геологическая. 1972. № 1. С. 112–119.
14. Фундаментальные проблемы Российской металлургии на пороге XXI века. Т. 3. Металлургия редких и рассеянных элементов / под ред. Д.В. Дробота. М.: РАЕН, 1999. 391 с.
15. Седых А.К. Кайнозойские рифтогенные впадины Приморья (геологическое строение, минерагения и геодинамика углегенеза). Владивосток: Дальнаука, 2008. 248 с.
16. Государственный баланс запасов полезных ископаемых Российской Федерации. На 01.01.2024 г. Вып. 28: Рассеянные элементы. М.: ФГБУ «Росгеолфонд», 2024.
17. Вялов В.И., Олейникова Г.А., Наставкин А.В. Особенности распределения германия в углях Павловского месторождения // Химия твердого топлива. 2020. № 3. С. 42–49.

18. В Приморье остановлено производство германия // Экспертный центр «ОСК». Горнорудная отрасль [Электронный ресурс]. URL: <https://osk-ec.ru/news/promyshlennaya-bezopasnost265/evrazes/sertifikatsiya-i-standartizatsiya/otraslevye-novosti/gornorudnaya-otrasl/show32490/#:~:text=ООО%2C%20%20Германи%20и%20приложения%20имеет%20лицензию,п> (дата обращения: 14.06.2025).

19. Коковкин А. А. Плейстоценовый уран-полиэлементный рудогенез на юге Дальнего Востока России – потенциальный ресурс гидрогенного урана // Разведка и охрана недр. 2022. № 3. С. 10–23.

20. Раковское буроугольное месторождение (участок Северо-Западный). Уголь бурый // Бизнес-портал NEDRADV. Месторождения [Электронный ресурс]. URL: https://nedradv.ru/nedradv/ru/find_place?obj=f2f5e2370b07304ef3b5b8e49147cda7#:~:text=Примечание (дата обращения: 14.06.2025).

21. Авдеев П.Б., Кужиков А.А., Куклина Г.Л. Перспективы использования германийсодержащих углей Тарбагатайского буроугольного месторождения в Забайкалье // Горный информационно-аналитический бюллетень (научно-технический журнал). 2015. № 4. С. 26–31.

22. Эландинское буроугольное месторождение. Германий. Уголь бурый // Бизнес-портал NEDRADV. Месторождения [Электронный ресурс]. URL: https://nedradv.ru/nedradv/ru/find_place?obj=j8560ecd43fb9377bb6ecc99eed0f3bba#:~:text=По%20состоянию%20на%2001,1%20от%201962%20г (дата обращения: 14.06.2025).

23. Гордиенко И.В. Ресурсы стратегического минерального сырья Республики Бурятия: состояние и перспективы развития // Науки о Земле и недропользование. 2020. Т. 43, № 1 (70). С. 8–35.

24. Кунаревская перспективная площадь. Германий. Железная руда. Кадмий. Медь. Свинец. Серебро. Цинк // Бизнес-портал NEDRADV. Месторождения [Электронный ресурс]. URL: https://nedradv.ru/nedradv/ru/find_place?obj=76537a414023f2809014b833d90a9ca3#:~:text=match%20at%20L327%20также%20содержится,0,26%25%3B%20фосфора%20от%200,01%20до (дата обращения: 14.06.2025).

25. Середин В.В. Производство германия из бурых углей месторождения Улантуга // Энергетик. 2012. № 3. С. 19–23.

26. Jiang T., Zhang T., Liu Z. Review on resources and recycling of germanium, with special focus on characteristics, mechanism and challenges of solvent extraction // Journal of Cleaner Production. 2021. Vol. 294. 126217. <https://doi.org/10.1016/j.jclepro.2021.126217>

27. Лапидус А.Л., Худяков Д.С., Бейлина Н.Ю., Трухина М.А., Козлов А.М., Жагфаров Ф.Г. Твердые горючие ископаемые как источник микроэлементов // Химия твердого топлива. 2022. № 1. С. 3–18.

28. Haghghi H.K., Irannajad M. Roadmap for recycling of germanium from various resources: reviews on recent developments and feasibility views // Environmental Science and Pollution Research. 2022. Vol. 29. P. 48126–48151. <https://doi.org/10.1007/s11356-021-18249-0>

29. Meshram P., Abhilash. Strategies for recycling of primary and secondary resources for germanium extraction // Mining, Metallurgy & Exploration. 2022. Vol. 39. P. 689–707. <https://doi.org/10.1007/s42461-022-00549-5>

REFERENCES

1. Höll R., Kling M., Schroll E. Metallogenesis of germanium – a review. *Ore Geology Reviews*. 2007;30(3):145–180. <https://doi.org/10.1016/j.oregeorev.2005.07.034>
2. Naumov A. V. Mirovoi rynok germaniya i ego perspektivy. *Izvestiya Vuzov. Tsvetnaya Metallurgiya*. 2007;(4):32–40. (In Russ.).
3. Shpirt M. Ya. Formy soedinenii mikrochlementov i ikh prevrashcheniya pri pererabotke tverdykh goryuchikh iskopaemykh. *Khimiya Tverdogo Topliva*. 2004;(6):62–84. (In Russ.).
4. Seredin V. V. Mestorozhdeniya germaniya. In: *Krupnye i superkrupnye rudnye mestorozhdeniya*. 3 vols. Vol. 3, Book 2. Moscow: IGEM RAN; 2006. P. 707–736. (In Russ.).
5. Arbuzov S. I., Il'enok S. S., Chekryzhov I. Yu. Formy nakhozhdeniya germaniya i vol'frama v germanii-ugol'nom mestorozhdenii Spetsugli (Dal'nii Vostok). *Izvestiya Tomskogo Politekhnicheskogo Universiteta. Inzhiniring Georesursov*. 2020;331(11):60–77. (In Russ.).
6. Ivanov V. V., Kats A. Ya., Kostin Yu. P., Meitov E. S., Solov'ev E. B. Promyshlennye tipy prirodnnykh kontsentratsov germaniya. Moscow: Nedra; 1984. 246 p. (In Russ.).
7. Levitskii V. V., Sedykh A. K., Ul'myasbaev Sh. G. Germanii-ugol'nye mestorozhdeniya Primor'ya. *Otechestvennaya Geologiya*. 1994;7:63–66. (In Russ.).
8. Seredin V. V. Metallonosnost' uglei: usloviya formirovaniya i perspektivy osvoeniya. In: *Ugol'naya baza Rossii*. Moscow: Geoinformmark; 2004;6:453–519. (In Russ.).

9. Vyalov V.I., Kuzevanova E.V., Nelyubov P.A. et al. Redkometall'no-ugol'nye mestorozhdeniya Primor'ya. *Razvedka i Okhrana Nedr*. 2010;(12):53–57. (In Russ.)
10. Arbuzov S.I., Chekryzhov I.Yu., Spears A., Ilenok S.S., Soktoev B.R., Popov N.Yu. Geology, geochemistry, mineralogy and genesis of the Spetsugli high-germanium coal deposit in the Pavlovsk coalfield, Russian Far East. *Ore Geology Reviews*. 2021;139(5). 104537. <https://doi.org/10.1016/j.oregeorev.2021.104537>
11. Saprykin F.Ya. Mestorozhdeniya germaniya. In: *Rudnye mestorozhdeniya SSSR*. 3 vols. Vol. 3. Moscow: Nedra; 1978. P. 464–471. (In Russ.)
12. Vyalov V.I., Larichev A.I., Kuzevanova E.V., Bogomolov A.Kh., Gamov M.I. Redkie metally v burougol'nykh mestorozhdeniyakh Primor'ya i ikh resursnyi potentsial. *Regional'naya Geologiya i Metallogeniya*. 2012;51:96–105. (In Russ.).
13. Kostin Yu.P., Meitov E.S. K genezisu mestorozhdenii vysokogermanienosnykh uglei i kriteriyam ikh poiskov. *Izvestiya AN SSSR. Seriya Geologicheskaya*. 1972;(1):112–119. (In Russ.).
14. Drobot D.V. (Ed.). Fundamental'nye problemy Rossiiskoi metallurgii na poroge XXI veka. Vol. 3. Metallurgiya redkikh i rasseyannykh elementov. Moscow: RAEN; 1999. 391 p. (In Russ.).
15. Sedykh A.K. Kainozoiskie riftogennye vpadiny Primor'ya (geologicheskoe stroenie, minerageniya i geodinamika uglegeneza). Vladivostok: Dal'nauka; 2008. 248 p. (In Russ.).
16. Gosudarstvennyi balans zapasov poleznykh iskopaemykh Rossiiskoi Federatsii. Na 01.01.2024 g. Iss. 28: Rasseyannye elementy. Moscow: FGBU "Rosgeofond"; 2024. (In Russ.).
17. Vyalov V.I., Oleinikova G.A., Nastavkin A.V. Osobennosti raspredeleniya germaniya v uglyakh Pavlovskogo mestorozhdeniya. *Khimiya Tverdogo Topliva*. 2020;(3):42–49. (In Russ.).
18. V Primor'e ostanovлено proizvodstvo germaniya. *Jekspertnyj centr «OSK». Gornorudnaja otrasl'* (In Russ.). URL: <https://osk-ec.ru/news/promyshlennaya-bezopasnost265/evrazes/sertifikatsiya-i-standartizatsiya/otraslevye-novosti/gornorudnaya-otrasl/show32490/#:~:text=OOO%C2%A0«Germanii%20i%20prilozheniYA»%20imeet%20litsenziyu,p> (date of application: May 14, 2025).
19. Kokovkin A.A. Pleistotsenovyi uran-polielementnyi rudogenez na yuge Dal'nego Vostoka Rossii – potentsial'nyi resurs gidrogennogo urana. *Razvedka i Okhrana Nedr*. 2022;(3):10–23. (In Russ.)
20. Rakovskoe burougol'noe mestorozhdenie (uchastok Severo-Zapadnyi). Ugol' buryi. *Biznes-portal NEDRADV. Mestorozhdenija*. (In Russ.). URL: https://nedradv.ru/nedradv/ru/find_place?obj=f2f5e2370b07304ef3b5b8e49147cda7#:~:text=Primechanie (date of application: May 14, 2025).
21. Avdeev P.B., Kuzhikov A.A., Kuklina G.L. Perspektivnyi ispol'zovaniya germaniisoderzhashchikh uglei Tarbagataiskogo burougol'nogo mestorozhdeniya v Zabaikal'e. *Gornyi Informatsionno-analiticheskii Byulleten'* (nauchno-tehnicheskii zhurnal). 2015;(4):26–31. (In Russ.).
22. Ehlandinskoe burougol'noe mestorozhdenie. Germanii. Ugol' buryi. *Biznes-portal NEDRADV. Mestorozhdenija*. (In Russ.). URL: https://nedradv.ru/nedradv/ru/find_place?obj=8560ecd43fb9377bb6ecc99ee0f03bba#:~:text=Po%20sostoyaniyu%20na%2001,1%20ot%201962%20g (date of application: May 14, 2025).
23. Gordienko I.V. Resursy strategicheskogo mineral'nogo syr'ya Respubliki Buryatiya: sostoyanie i perspektivnyi razvitiya. *Nauki o Zemle i Nedropol'zovanie*. 2020;43(1):8–35. (In Russ.)
24. Kunarevskaya perspektivnaya ploshchad'. Germanii. Zheleznaia ruda. Kadmii. Med'. Svinets. Serebro. Tsink. *Biznes-portal NEDRADV. Mestorozhdenija*. (In Russ.). URL: https://nedradv.ru/nedradv/ru/find_place?obj=76537a414023f2809014b833d90a9ca3#:~:text=match%20at%20L327%20takzhe%20soderzhitsya,0.26%25%3B%20fosfora%20ot%200.01%20do (date of application: May 14, 2025).
25. Seredin V.V. Proizvodstvo germaniya iz burykh uglei mestorozhdeniya Ulantuga. *Ehnergetik*. 2012;(3):19–23. (In Russ.).
26. Jiang T., Zhang T., Liu Z. Review on resources and recycling of germanium, with special focus on characteristics, mechanism and challenges of solvent extraction. *Journal of Cleaner Production*. 2021;294. 126217. <https://doi.org/10.1016/j.jclepro.2021.126217>
27. Lapidus A.L., Khudyakov D.S., Beilina N.Yu., Trukhina M.A., Kozlov A.M., Zhagfarov F.G. Tverdye goryuchie iskopaemye kak istochnik mikroelementov. *Khimiya Tverdogo Topliva*. 2022;(1):3–18. (In Russ.).
28. Haghhighi H.K., Irannajad M. Roadmap for recycling of germanium from various resources: reviews on recent developments and feasibility views. *Environmental Science and Pollution Research*. 2022;29:48126–48151. <https://doi.org/10.1007/s11356-021-18249-0>
29. Meshram P., Abhilash. Strategies for recycling of primary and secondary resources for germanium extraction. *Mining, Metallurgy & Exploration*. 2022;39:689–707. <https://doi.org/10.1007/s42461-021-00476-4>

Научная статья

УДК 553.086

DOI: 10.7868/S3034530825050043

Особенности вещественного состава кайнозойских угленосных отложений Павловской впадины в связи с проблемой их металлоносности

А.И. Матвеева, А.В. Руслан[✉], Н.Ю. Попов

Алёна Игоревна Матвеева

техник

Дальневосточный геологический институт ДВО РАН, Владивосток, Россия

alenamatveeva0307@gmail.com

<https://orcid.org/0009-0006-5123-3527>

Алексей Валерьевич Руслан

кандидат геолого-минералогических наук, младший научный сотрудник

Дальневосточный геологический институт ДВО РАН, Владивосток, Россия

aleksei_ruslan@mail.ru

<http://orcid.org/0000-0003-4034-2251>

Никита Юрьевич Попов

младший научный сотрудник

Дальневосточный геологический институт ДВО РАН, Владивосток, Россия

popov_ni22@mail.ru

<http://orcid.org/0000-0002-3401-2849>

Аннотация. В работе рассматриваются особенности вещественного состава подугольных, угленосных и надугольных отложений в связи с проблемой металлоносности Павловской впадины, расположенной на южной окраине Ханкайского срединного массива в Приморском крае. Опробованные стратиграфические уровни характеризуются сходным составом, но различаются в процентном содержании основных и акцессорных минералов (кварц, каолинит, циркон, гранат, анатаз, лейкоксен, ильменит, рутил и др.). Установлены морфологические и составные особенности распространенных акцессорных и рудных минералов. В результате исследования получили подтверждение опубликованные ранее данные по формам нахождения и переносу германия, вольфрама, сурьмы, мышьяка и редкоземельных элементов (РЗЭ) в осадочных отложениях и коре выветривания Павловской впадины, которые свидетельствуют о гипергенном генезисе германий-угольного месторождения Спецугли. Источником поступления группы редких элементов в угли являлись грейзенезированные граниты фундамента, для Ge, W, As, Sb находит подтверждение гидрогенная форма переноса, для РЗЭ – гидрогенно-кластогенная. Источник обнаруженных редких частиц чешуйчатого золота в неогеновых отложениях пока не установлен.

Ключевые слова: минералого-geoхимический состав, электронная микроскопия, металлоносность углей, германий, Павловское буруугольное месторождение

Для цитирования: Матвеева А.И., Руслан А.В., Попов Н.Ю. Особенности вещественного состава кайнозойских угленосных отложений Павловской впадины в связи с проблемой их металлоносности // Вестн. ДВО РАН. 2025. № 5. С. 53–66. <http://dx.doi.org/10.7868/S3034530825050043>

Финансирование. Работа выполнена в рамках государственного задания Минобрнауки России для ДВГИ ДВО РАН.

Original article

Peculiarities of the material composition of Cenozoic coal-bearing deposits of the Pavlovskaya depression in connection with the problem of their metal content

A.I. Matveeva, A.V. Ruslan, N.Yu. Popov

Alena I. Matveeva

Technician

Far East Geological Institute, FEB RAS, Vladivostok, Russia

alenamatveeva0307@gmail.com

<https://orcid.org/0009-0006-5123-3527>

Alexei V. Ruslan

Candidate of Sciences in Geology and Mineralogy, Junior Researcher

Far East Geological Institute, FEB RAS, Vladivostok, Russia

aleksei_ruslan@mail.ru

<http://orcid.org/0000-0003-4034-2251>

Nikita Yu. Popov

Junior Researcher

Far East Geological Institute, FEB RAS, Vladivostok, Russia

popov_ni22@mail.ru

<http://orcid.org/0000-0002-3401-2849>

Abstract. The paper examines the features of the material composition of subcoal, coal-bearing and supracoal deposits in connection with the problem of metal content of the Pavlovskaya Depression located on the southern edge of the Khankaisky median massif in Primorsky Krai. The tested stratigraphic levels are characterized by a similar composition, but differ in the percentage content of the main and accessory minerals (quartz, kaolinite, zircon, garnet, anatase, leucoxene, ilmenite and rutile, etc.). Morphological and compositional features of common accessory and ore minerals are established. As a result of the study, previously published data on the forms of occurrence and transfer of germanium, tungsten, antimony, arsenic and rare earth elements (REE) in sedimentary deposits and the weathering crust of the Pavlovskaya Depression were confirmed, which indicate the hypergene genesis of the Spetsugli germanium-coal deposit. The source of the rare element group entering the coals were greisenized granites of the basement; for Ge, W, As, Sb the hydrogenic form of transfer is confirmed, for REE the hydrogenic-clastogenic form. The source of the rare particles of flaky gold found in the Neogene deposits has not yet been established.

Keywords: mineralogical and geochemical composition, electron microscopy, metal content of coals, germanium, Pavlovskoye brown coal deposit

For citation: Matveeva A.I., Ruslan A.V., Popov N.Yu. Peculiarities of the material composition of Cenozoic coal-bearing deposits of the Pavlovskaya depression in connection with the problem of their metal content. *Vestnik of the FEB RAS*. 2025;(5):53–66. (In Russ.). <http://dx.doi.org/10.7868/S3034530825050043>

Funding. The work was carried out within the framework of the state assignment of the Ministry of Science and Higher Education of the Russian Federation for the Far East Geological Institute, FEB RAS.

Введение

Кайнозойская Павловская впадина известна не только своей промышленной угленосностью, но также и полиэлементной (скорее всего, полигенной и полихронной) рудоносностью, проявленной в углях и углистых породах (Ge, W, Sb, Cs, Au, РЗЭ), а также в породах обрамления и фундамента (РЗЭ, Au, Sn и др.) [1–9].

Цель проведенного исследования – изучение минералого-geoхимических особенностей и выявление возможных источников металлоносности кайнозойских угленосных отложений Павловской впадины с учетом современных представлений по ее стратиграфии и металлогении, а также с привлечением новых данных по минералогии осадочного чехла и пород фундамента. В работе получены новые прецизионные данные по минералогии полихронных и полигенных подугольных, угленосных и надугольных толщ, что позволяет (с привлечением geoхимических данных) сделать заключение по возможным источникам поступления некоторых редких и благородных элементов, обусловивших промышленную (германий) и потенциально промышленную (золото, редкие земли, вольфрам, сурьма) металлоносность отложений Павловской впадины.

Материалы и методы исследования

На начальном этапе исследования нами проводился отбор проб из коры выветривания по гранитам (фундамент впадины) и с четырех уровней осадочных отложений на двух участках Павловского месторождения – Спецугли (законсервированный карьер) и рядом расположенный Павловский-2 (действующий карьер). Материал был отобран с двух участков в связи с отсутствием на момент отбора проб нужных уровней на одном из них.

Уровни отбора представительных проб (стратиграфия отложений впадины по [10–12]) (рис. 1):

1. Подугольные отложения: кора выветривания позднепалеозойских гранитов на точке отбора на участке Спецугли была представлена преимущественно каолином с примесью крупных зерен кварца.

2. Угленосные отложения: из палеогеновых угленосных отложений павловской свиты была отобрана объемная пробы оглиниенного алевролита в центральной части между пластами Первый и Второй на участке Павловский-2.

3. Надугольные отложения: из неогеновых туфогенных отложений нежинской свиты (ранее относимых к усть-суйфунской свите) была отобрана пробы слабосцементированного песка на участке Спецугли.

4. Рыхлые раннечетвертичные песчано-галечниковые отложения с остатками древесины суйфунской свиты: отобрана пробы суглинистых песков на участке Павловский-2.

5. Средне-верхнечетвертичные отложения в разрезе представлены бурыми суглинками: взята пробы суглинков с участка Павловский-2.

Подготовка и изучение материала проводились в аналитическом центре ДВГИ ДВО РАН. В процессе обработки пробы промывались до состояния серого-черного шлиха, а при необходимости и сильном загрязнении – предварительно отмучивались. Затем полученные шлихи рассортировывались на классы разной крупности, а также разделялись на магнитные и немагнитные фракции с последующим разделением в тяжелой жидкости (бромоформ). Отбор минералогических разностей, анализ их морфологии и внешнего вида зерен, характерных для каждого представительного уровня отбора проб, производился на бинокуляре Leica-EZ4.

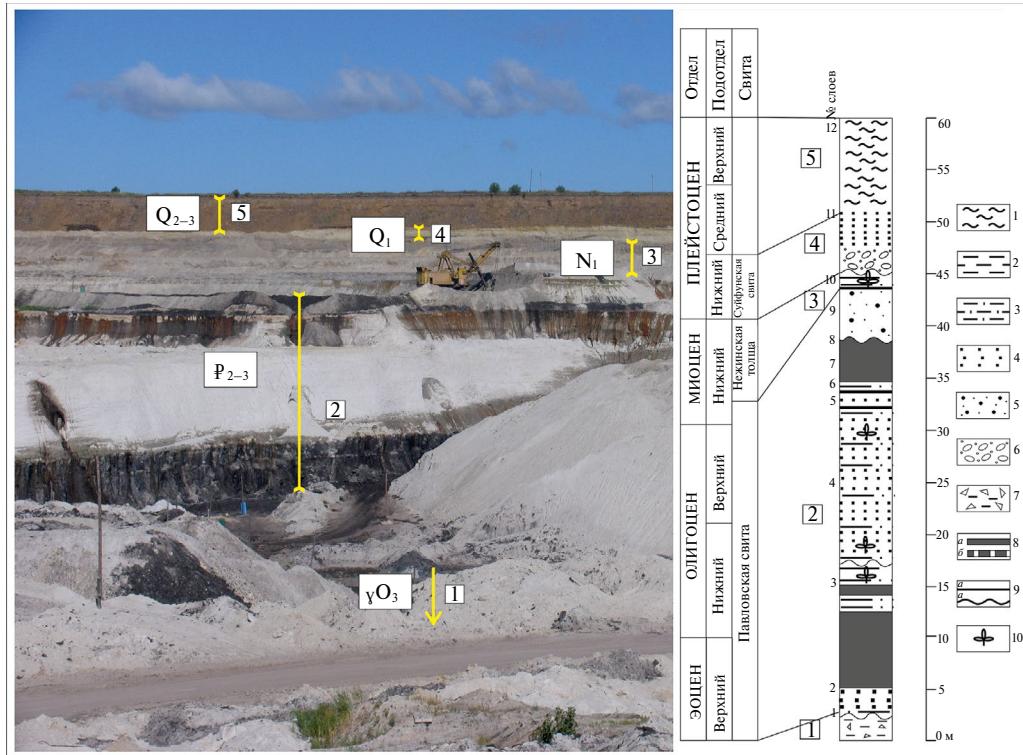


Рис. 1. Общий вид угольного разреза Павловский-2 с указанием стратиграфических уровней отбора проб и стратиграфическая колонка по данным работы [10]. Условные обозначения: 1 – бурые суглинки; 2 – глины аргиллитоподобные, аргиллиты; 3 – алевролиты; 4 – песчаники, пески плотные; 5 – гравийники; 6 – галечники; 7 – щебень, дресва в глинистом заполнителе; 8 – угли бурые (а), алевролиты углистые (б); 9 – границы (а – литологические, б – несогласные); 10 – отпечатки листьев

С каждой пробы были отобраны разности минералов, показывающие полную картину конкретного уровня, и прикреплены на столбик с углеродистым скотчем. На него напылялся углерод и производился предварительный анализ на сканирующем электронном микроскопе Jeol JCM-6000. Далее подготавливалась эпоксидная шашка для более детального и точного анализа минералов в полированном срезе.

Краткий геологический очерк

В геологическом отношении Павловская тектоническая угленосная депрессия приурочена к южной окраине Ханкайского срединного массива (=супертеррейна) (рис. 2).

Связанное с ней Павловское угольное поле состоит из нескольких таких обособленных угленосных впадин, сформировавшихся в позднекайнозойскую стадию развития территории. Фундамент угольного поля представлен раннекембрийскими отложениями (лузановская и дальзаводская свиты), а также палеозойскими гранитами с мощной (частично переотложенной) корой выветривания. Кайнозойский осадочный комплекс включает (снизу): промышленно угленосную павловскую свиту (верхний эоцен–олигоцен) – песчаники, алевролиты, аргиллиты, угли, с дресвино-щебнистыми каолинитовыми суглинками в основании разреза (30–40 м); нежинскую свиту (нижний миоцен) – туффиты, туфоалевролиты, туфопесчаники, галечники, маломощные линзовидные пропластки низкомарочного угля (до 55 м); суйфунскую свиту (эоплейстоцен) – галечники, пески (до 20 м), «бурые суглинки» (средний–верхний плейстоцен) – желтовато-серые, желто-коричневые суглинки (до 10 м). Возраст всех составляющих разреза базируется на комплексах макро- и микрофоссилий, а также радиоизотопных датировках [10].

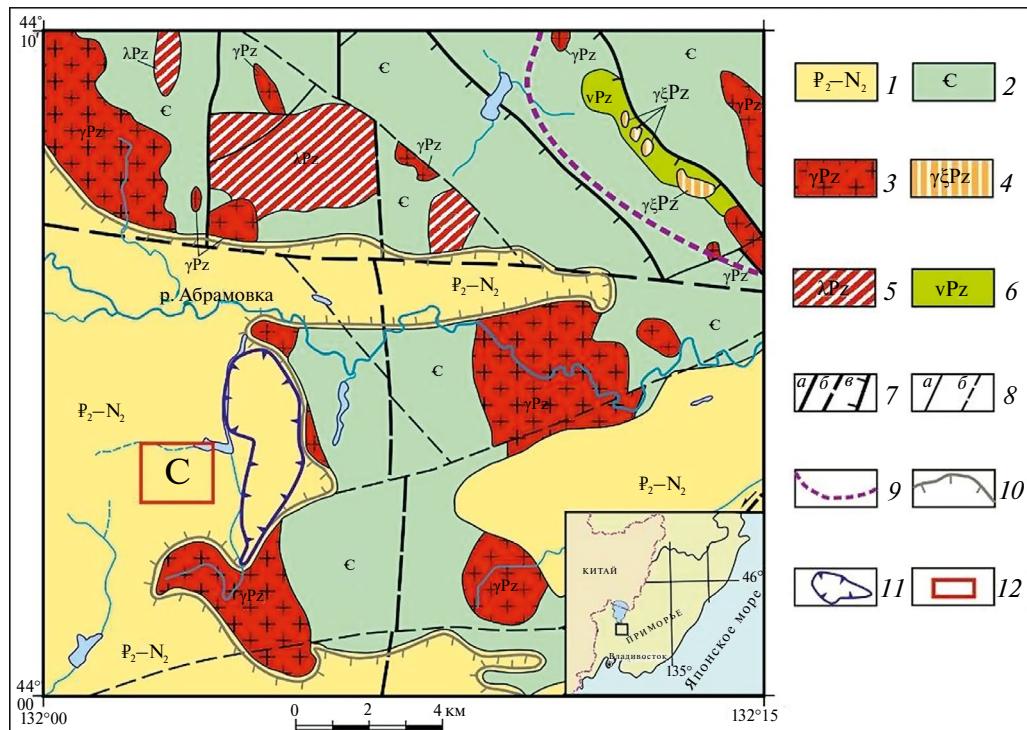


Рис. 2. Геологическая карта района (по данным работы [13], с изменениями [14]). Условные обозначения: 1 – палеоген-неогеновые песчано-галечниковые (неоген) и угленосные отложения (песчаники, алевролиты, аргиллиты и угли) (палеоген); 2 – кембрийские отложения (сланцы серицитовые, кварц-серицитовые, углеродистые, алевролиты, линзы известняков); палеозойские магматические породы: 3 – граниты; 4 – граносиениты; 5 – риолиты; 6 – габбро и габбро-диориты; 7 – главные разломы (*a* – достоверные, *б* – предполагаемые, *в* – надвиги); 8 – второстепенные разломы (*a* – установленные, *б* – предполагаемые); 9 – Вознесенский рудный район; 10 – граница угленосных отложений Павловского угольного поля; 11 – рабочий участок Павловский-2; 12 – контур месторождения Спецугли (С)

Литолого-фациональные условия формирования Павловской впадины были детально изучены А.К. Седых [6]. По его данным, осадочный чехол Павловской впадины состоит преимущественно из озерно-болотных и аллювиальных отложений. Анализ ритмичности угленосных отложений показал преобладание в разрезах симметричных и нормально-асимметричных озерно-болотных микроритмов. В начальных и конечных стадиях формирования угленосных формаций ограниченно распространены озерно-аллювиальные обратно-ассиметричные микроритмы, что и указывает на преобладание озерно-болотных фациальных обстановок. Тип угленосной формации был определен как потамическо-лимнический, а ландшафтные условия были близки к современной прибрежной зоне оз. Ханка [6]. Таким образом, осадочный чехол впадины является не только полихронным, но и полигенным, что позволяет предполагать смену условий и направления терригенного (гидрогенного и кластогенного) выноса редких элементов в угленосные отложения.

Павловское буроугольное месторождение известно аномальной металлоносностью [1–2, 6–8, 14, 15], в первую очередь крупнейшими промышленными запасами германия на участке Спецугли. Германиеносные угольные пласти аномально обогащены Au, As, Sb, W, Mo, Be, U, Cs и др. С.И. Арбузовым [14] было установлено, что основным источником аномальных содержаний Ge, W и РЗЭ в углях на участке Спецугли являются грейзенезированные граниты, слагающие выступ фундамента. Морфологически разнообразная благороднометалльная (Au) минерализация, по данным В.В. Середина [15], развита на

разных уровнях месторождения – от фундамента до четвертичных отложений, что говорит о ее полихронности и полигенности.

Результаты

Тяжелая и легкая фракции из различных стратиграфических уровней имеют сходный минеральный состав, однако различаются процентным содержанием основных минералов, что свидетельствует о смене направлений и источников сноса терригенного материала. Проведенное исследование позволило сделать соответствующие выводы и сопоставить их с более ранними исследованиями. Тематическими работами Приморского геологического управления¹ на основании спорово-пыльцевого анализа было произведено предварительное расчленение палеоген-неогеновых отложений, дана литологическая и минералогическая характеристика пород установленных на то время стратиграфических подразделений. Наше исследование на сканирующем электронном микроскопе Jeol JCM-6000 с аналитической приставкой позволило прецизионно верифицировать минеральные виды, присутствующие в разновозрастных отложениях Павловской впадины, на основе современной стратиграфической схемы [10].

Подгольные отложения сложены продуктами выветривания гранитов – преимущественно каолинитом и крупнозернистым кварцем. Изначально граниты имели лейкократовый состав с преобладанием кварца и полевого шпата. Возраст гранитов, определенный U-Pb-методом, составляет $448,2 \pm 4,1$ млн лет [14], что позволило их отнести к редкометалльному вознесенскому комплексу. Минеральный состав подгольной коры выветривания по гранитам, согласно более ранним данным², представлен в виде процентных интервалов, отражающих вариативность состава по пробам: циркон (до 67%), анатаз (до 15,8%), ильменит (до 36,7%). Реже встречаются турмалин, хромитовые слюды, монацит, ксенотим, гранат, брукит, единичные зерна рутила, эпидота, кассiterита, а также марганцевые оксиды. Нами установлены и верифицированы в тяжелой фракции (рис. 3, А) следующие минералы: циркон, бурый циркон, кварц, ильменит, рутил, лейкоксен.

Угленосные отложения павловской свиты палеогенового возраста характеризуются следующим минеральным составом тяжелой фракции (см. рис. 3, Б): циркон (9–40%), анатаз (1–16%), лейкоксен (4–50%), ильменит (23–62%). Часто встречаются апатит, рутил, брукит, гранат, турмалин, хромит, бурый циркон. Реже присутствуют сфен, эпидот, амфибол, шпинель, корунд, хлорит, биотит, ортит, ксенотим, монацит. В ходе работы нами идентифицированы минералы: ильменит, циркон, кварц, гранат, эпидот, калиевый полевой шпат, брукит, кассiterит, хлорит, хромшпинель, лейкоксен.

Тяжелая фракция надугольных отложений нежинской свиты неогенового возраста (см. рис. 3, В) содержит: циркон (1–29%), апатит (1–4%), анатаз (1–10%), лейкоксен (1–35%), ильменит (21–80%), гранат (1–60%), турмалин (1–25%). Часто встречаются рутил, эпидот, барит; единично – брукит, сфен, амфибол, хромит, ортит, биотит, хлорит, кассiterит, вулканическое стекло. С помощью энергодисперсионного анализа нами верифицированы следующие минералы: ильменит, циркон, кварц, гранат, эпидот, полевой шпат, анатаз, брукит, рутил, ксенотим, плагиоклаз, ортит, апатит.

Четвертичные отложения суйфунской свиты ранее не были охарактеризованы в минералогическом отношении. Состав тяжелой фракции (см. рис. 3, Г) включает минералы: ильменит, циркон, кварц, гранат, эпидот, полевой шпат, рутил, брукит, сфен, плагиоклаз, турмалин, мусковит, лейкоксен, хлорит, корунд, хромпикатит, роговая обманка, биотит, монацит, энстатит, дистен. Также обнаружено зерно самородного золота (см. рис. 3, Е), по морфологии имеющее, вероятно, кластогенное происхождение.

Минералогическая характеристика бурых суглинков, слагающих часть четвертичных отложений, также не проводилась ранее. Установленный нами минеральный состав тяжелой фракции (см. рис. 3, Д) включает: ильменит, циркон, гранат, эпидот, полевой шпат, брукит, кассiterит, гипс, эгирин.

¹ Асипов А.А., Соколова Н.И. и др. Отчет литологической лаборатории ЦЛ ПГУ за 1968 г.

² Там же.

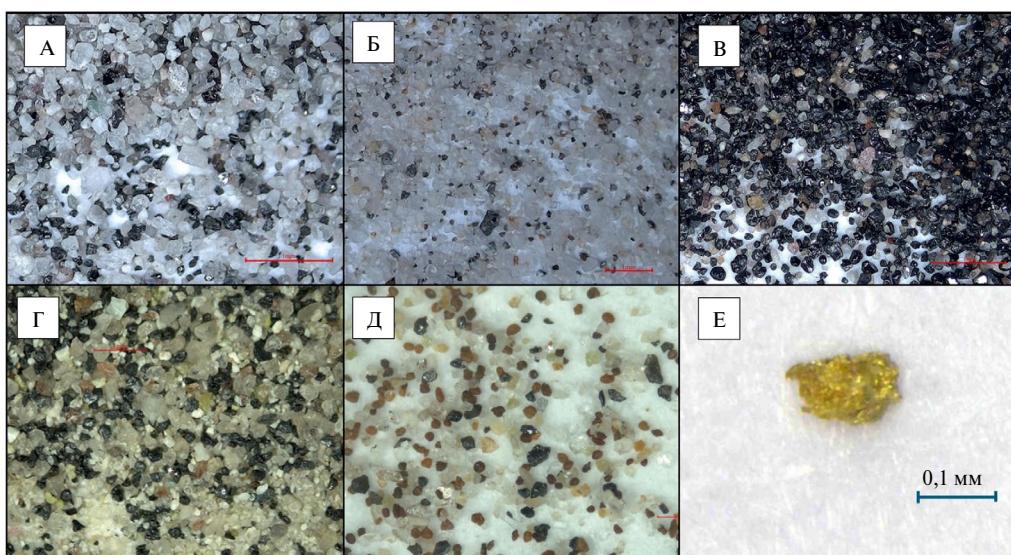


Рис. 3. Тяжелая фракция изучаемых отложений с уровнями: А – кора выветривания гранитов, Б – угленосные отложения (павловская свита), В – надугольные отложения (некинская свита), Г – четвертичные отложения суйфунской свиты, Д – четвертичные отложения, бурые суглинки, Е – частица золота из суйфунской свиты

Описание минералов и их особенностей

Часто встречающиеся минералы (рис. 4)

Кварц SiO_2 – прозрачный, мутный, желтоватый, розовый, зеленый, коричневатый, иногда с пылеватыми включениями; форма зерен – от угловатых и окатанных до бесформенных.

Ильменит FeTiO_3 – черный, часто участками лейкоксенезированный; форма зерен – таблитчатая, угловато-окатанная или полуокатанная, с корродированной или блестящей поверхностью, встречаются решетки распада.

Лейкоксен $\text{Fe}_2\text{Ti}_3\text{O}_9$ – серый, буроватый, желтоватый, коричневый, иногда с рыжеватым оттенком; форма зерен – толстотаблитчатая, бесформенно окатанная; часто образует оболочки вокруг ильменита или в плотном срастании с ним.

Циркон $\text{Zr}[\text{SiO}_4]$ – прозрачный, мутный, белый, розовый, буроватый, фиолетовый; форма – призматическая, копьевидная, дипирамидальная. Зерна от неокатанных до окатанных обломков с разной поверхностью от шероховатой до блестящей.

Отдельно выделен **бурый циркон** – дипирамидально-призматический, преимущественно в виде обломков; содержит примеси U и Th.

Гранат, близкий по составу альмандину $\text{Fe}_3\text{Al}_2[\text{SiO}_4]_3$ и спессартину $\text{Mn}_3\text{Al}_2[\text{SiO}_4]_3$ – от бледно- до насыщенного розового, а также желтоватых оттенков; присутствует в виде угловатых и неокатанных обломков.

Дравит-Шерл $\text{Na}(\text{Mg},\text{Fe})_3\text{Al}_6(\text{BO}_3)_3[\text{Si}_6\text{O}_{18}] (\text{O},\text{OH},\text{F})_4$ – темные, темно-серые зерна кубоподобной формы с характерной штриховкой.

Анатаз TiO_2 – желтоватый, грязно-серый, остропирамидальный; некоторые зерна окатанные.

Калиевый полевой шпат $(\text{K},\text{Na})[\text{AlSi}_3\text{O}_8]$ часто пелитизирован, встречается в виде угловатых обломков белого, серого, розового, желтого цветов.

Плагиоклаз (An_{13-39}) – белый, ярко красный, шероховатый, бесформенный.

Эпидот $\text{Ca}_2\text{Al}(\text{Fe}^{3+},\text{Al})[\text{Si}_2\text{O}_7][\text{SiO}_4]\text{O}[\text{OH}]$ – полупрозрачный, салатового оттенка; бесформенные угловатые обломки с шероховатой поверхностью.

Роговая обманка $\text{Ca}_2\text{Na}(\text{Mg},\text{Fe}^{2+})_4(\text{Al},\text{Fe}^{3+})[(\text{Si},\text{Al})_8\text{O}_{11}]_2[\text{OH}]_2$ – черно-зеленого цвета, слоистая структура.

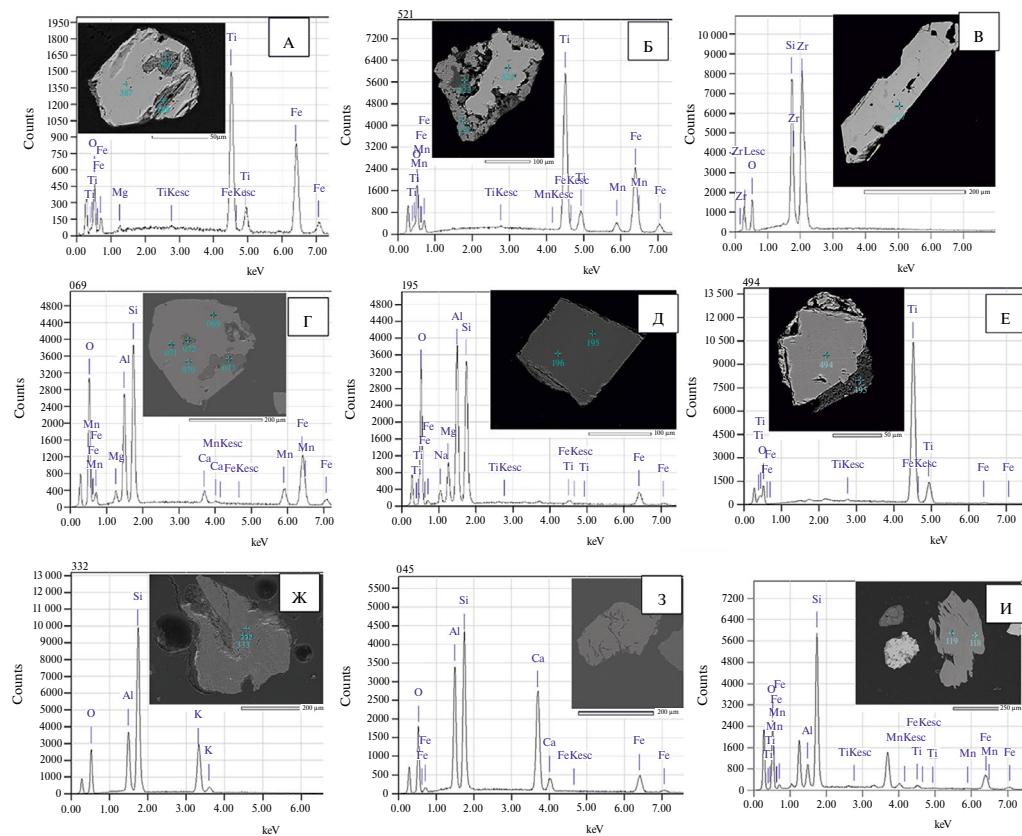


Рис. 4. Часто распространенные в отложениях минералы и уровни их отбора (см. рис. 1): А – ильменит (ур. 2), Б – лейкоксен (ур. 3), В – циркон (ур. 3), Г – гранат (ур. 4), Д – турмалин (ур. 4), Е – анатаз (ур. 3), Ж – КПШ (ур. 4), З – эпидот (ур. 4), И – роговая обманка (ур. 4)

Средне встречаемые минералы (рис. 5)

Рутил TiO_2 – сероватый, коричнево-красный, бурый; угловатые полуокатанные и неокатанные обломки.

Брукит TiO_2 – ярко-красный, коричневатый, зерна таблитчатые, бесформенные, неокатанные.

Сфен $CaTi[SiO_4]O$ – желтые, белые кристаллы, чаще в виде обломков или включений.

Анатаз $Ca_5[PO_4]_3(F,Cl,OH)$ – преимущественно в виде включений в других минералах, таких как ильменит, циркон и др.

Хлорит $(Mg,Fe)_3[(Si,Al)_4O_{10}](OH)_2 \cdot (Mg,Fe)_3(OH)_6$ – желто-зеленый или изумрудный, бесформенные зерна.

Мусковит $KAl_2[AlSi_3O_{10}](OH)_2$ – бело-желтый, перламутровый, в виде чешуек.

Биотит $K(Mg,Fe)_3[AlSi_3O_{10}][OH, F]_2$ – темно-коричневый или черный, с характерной шестигранной формой.

Гипс $Ca[SO_4] \cdot 2H_2O$ – серовато-белый, чешуйчатые зерна с шелковистым блеском.

Корунд Al_2O_3 – темно-зеленое мутное бесформенное зерно.

Касситерит SnO_2 – желто-коричневый, бесформенный, неокатанный.

Редко встречаемые минералы (рис. 6)

Ксенотит $Y[PO_4]$ – бледно-серый, неокатанный.

Ортит $(Ca,Ce,La,Y)_2(Al,Fe)_3[Si_2O_7][SiO_4]O[O,OH]$ – темно-серый, неокатанные обломки.

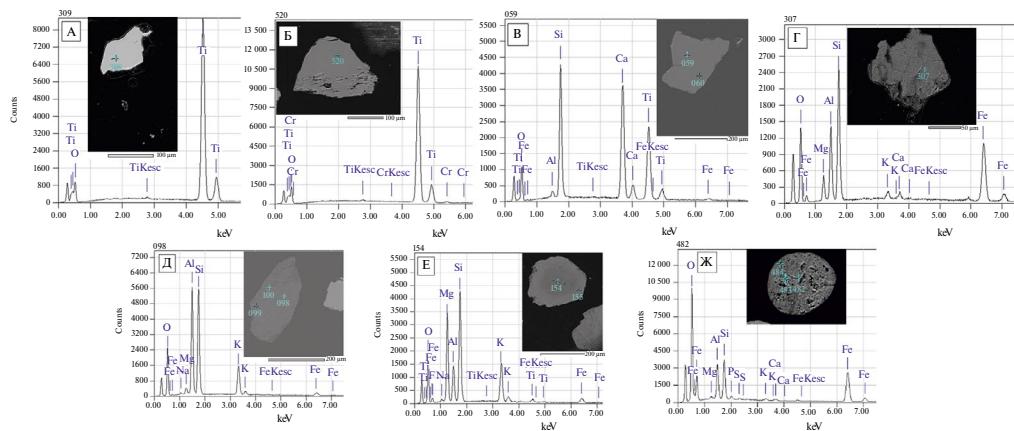


Рис. 5. Средние по встречаемости минералы: А – рутил (ур. 2), Б – брукит (ур. 3), В – сфен (ур. 4), Г – хлорит (ур. 2), Д – мусковит (ур. 4), Е – биотит (ур. 4), Ж – касситерит (ур. 5)

Монацит $(\text{Ce},\text{La},\text{Nd},\dots)[\text{PO}_4]$ – салатовый, с матовым блеском с шероховатой поверхностью.

Самородное золото Au – ярко-желтое, зерна имеют металлический блеск и чешуйчатое строение (см. рис. 3, Е).

Энстатит $\text{Mg}_2[\text{Si}_2\text{O}_6]$ – обломок темного цвета, не имеет выраженного блеска, угловатый.

Дислен $\text{Al}_2[\text{SiO}_4]\text{O}$ – серо-белого цвета, наблюдается в форме чешуек.

Эгирин $\text{NaFe}^{3+}[\text{Si}_2\text{O}_6]$ – темно-зеленый, бесформенный.

Хромпикатит $(\text{Mg},\text{Fe})(\text{Cr},\text{Al})_2\text{O}_4$ – черный, матовый, с редко сохранившимися гранями.

Обсуждение результатов

Исходя из минерального состава отложений каждого изученного стратиграфического уровня можно говорить об отсутствии собственных минералов германия, вольфрама и сурьмы в осадочных отложениях и коре выветривания. Привнос большинства изученных элементов (за исключением золота и РЗЭ) осуществлялся преимущественно гидрогенным способом (в растворенном виде), что свидетельствует о разном характере поступления германия, вольфрама, редкоземельных элементов (РЗЭ) и золота в угли и угленосные отложения. Этот вывод также находит подтверждение при интерпретации геохимических данных по углям, гранитам и ископаемой древесине участка Спецугли. Среднее содержание основных элементов примесей находится в углях германиеносных пластов месторождения Спецугли, г/т, также представлены содержания элементов в ископаемой древесине (СУ-9-18), туфе (СУ-21-18), алевролите (СУ-32-18), песчанике (СУ-39-18), гранитах (СУ-55-18) и в углях разреза (см. таблицу).

Как следует из средних оценок по пластам на исследуемом участке (см. таблицу), для германиеносных углей месторождения характерно аномальное, превышающее в десятки и даже сотни раз среднее содержание для бурых углей мира, содержание Ge , Li , Be , Cs , As , Sb , Hg и W . Менее выраженные, но все же значительные концентрации установлены для U , Mo , Y , Rb , средних и тяжелых лантаноидов, а также Zn и Ga . Поскольку в ископаемой древесине сколько-нибудь значимые содержания элементов могут накапливаться только гидрогенным путем, то, соответственно, отсутствие в коре и осадках минералов таких элементов, как германий, вольфрам, сурьма и мышьяк, при их высоких концентрациях в малозольных углях и ураганных в ископаемой древесине, свидетельствует об их гидрогенной природе привноса. Согласно полученным данным, в древесине отмечается накопление всех лантаноидов при отчетливом преобладании тяжелых, но содержания невысокие (относительно

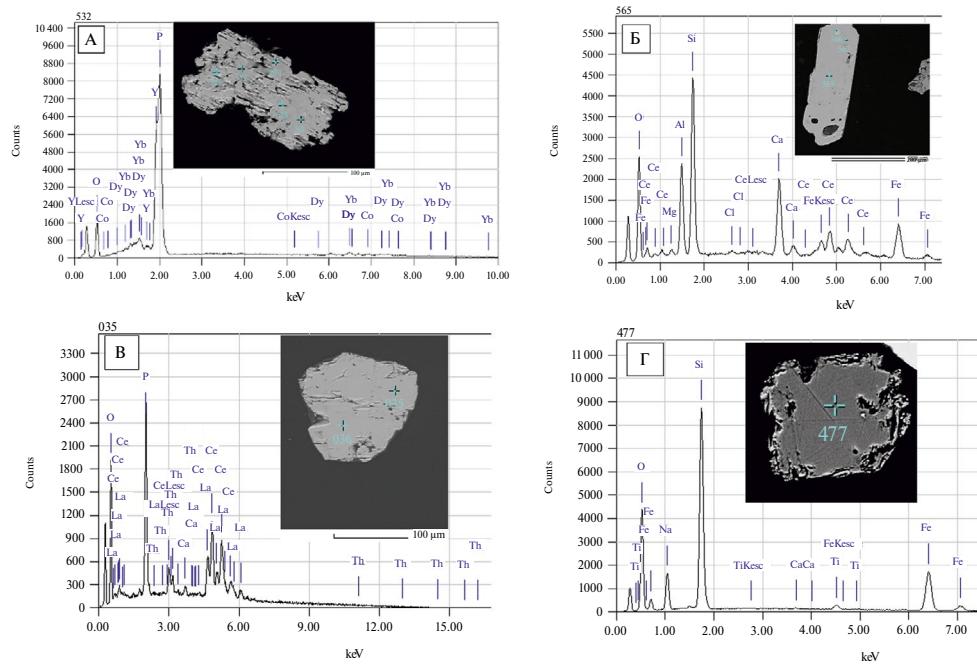


Рис. 6. Редко встречающиеся минералы: А – ксенотит (ур. 3), Б – ортит (ур. 3), В – монацит (ур. 4), Г – эгирин (ур. 5)

углей и тем более гранитов). Наличие минералов РЗЭ в осадочных уровнях свидетельствует о кластогенном обогащении ими углей. Источником этих элементов в углях, независимо от их формы переноса, являются граниты фундамента, что было доказано на представительном материале на примере участка Спецугли [9, 14]. Что касается природы и источников золота в угленосных отложениях, его поступление, по всей видимости, про- исходило преимущественно кластогенным путем.

Среднее содержание основных элементов примесей в породах и германиеносных пластиах Павловского месторождения, г/т [14]

Эле-мент	Ископаемая дре-весина (СУ-9-18)	Туф (СУ-21-18)	Алевролит (СУ-32-18)	Песчаник (СУ-39-18)	Гранит (СУ-55-18)	Среднее для углей разреза	Кларк для угля*
Li	4,6	27,1	61,0	63,3	28,1	105	10±1
Be	10,0	1,6	7,1	6,6	3,9	54,4	1,2±0,1
Sc	1,70	5,88	14,69	13,82	8,12	5,3	4,1±0,2
V	200,10	29,62	72,15	76,16	6,75	45,3	22±2
Cr	27,39	22,89	36,46	43,64	6,21	19,4	15±1
Co	2,48	5,77	8,06	16,26	14,31	10	4,2±0,3
Ni	2,45	8,97	11,67	31,81	0,35	16,8	9,0±0,9
Cu	3,77	2,63	26,02	36,88	4,00	22,4	15±1

Продолжение таблицы

Эле- мент	Ископае- мая дре- весина (СУ-9-18)	Туф (СУ-21-18)	Алевролит (СУ-32-18)	Песчаник (СУ-39-18)	Гранит (СУ-55-18)	Среднее для углей разреза	Кларк для угля*
Zn	5,55	22,2	97,23	165,14	49,6	64,2	18±1
Ga	11,11	13,14	30,35	24,22	36,31	14,5	5,5±0,3
Ge	5306	3	2	4	26	1249	2,0±0,1
As	51,86	3	18	35	72,84	157	7,6±1,3
Se	0,69	0,751	1,29	0,66	47,52	2,6	1,0±0,15
Rb	8,52	53,39	129,3	133,5	311,4	42,8	10±0,9
Sr	135,15	30,2	99,20	126,5	82	96,5	120±10
Y	18,52	29,30	44,21	40,35	467,1	77,8	8,6±0,4
Zr	144,50	611,2	175,7	241,1	192,5	74,2	35±2
Nb	42,33	30,24	10,80	19,16	38,41	5,2	3,3±0,3
Mo	90,05	2,63	1,25	0,90	1,75	6,8	2,2±0,2
Ag	0,23	0,343	0,47	0,32	0,206	0,13	0,09±0,02
Cd	0,16	0,178	0,38	0,74	0,266	0,56	0,24±0,04
Sn	0,57	3,53	3,86	4,82	5,97	1,3	0,79±0,09
Sb	2713,67	3	1	8	7,36	312	0,84±0,09
Cs	4,85	10,58	24,81	26,33	7,08	37,1	0,98±0,1
Ba	467,49	266,9	470,9	501,0	406,4	209	150±20
La	3,26	19,48	70,88	52,48	1063	19,2	10±0,5
Ce	6,76	35,27	149,2	116,3	990,7	39	22±1
Pr	0,86	3,96	14,35	13,24	249,7	5,1	3,5±0,3
Nd	3,72	12,54	51,13	48,27	807,6	21,7	11±1
Sm	1,18	2,70	10,30	9,70	187,2	5,9	1,9±0,1
Eu	0,26	0,38	1,31	1,49	8,38	1,2	0,50±0,02
Gd	1,92	2,57	7,99	5,92	117,6	8,3	2,6±0,2
Tb	0,40	0,44	1,14	1,00	17,38	1,5	0,32±0,03
Dy	3,34	4,27	7,20	6,62	87,98	10,3	2,0±0,1
Ho	0,81	0,83	1,38	1,33	12,77	2,3	0,50±0,05
Er	2,51	2,83	3,58	4,04	32,38	7	0,85±0,08
Tm	0,44	0,45	0,72	0,71	4,56	1,1	0,31±0,02
Yb	3,15	3,82	3,56	4,26	26,46	6,4	1,0±0,05
Lu	0,47	0,64	0,51	0,53	3,07	1	0,19±0,02

Окончание таблицы

Элем- ент	Ископае- мая дре- весина (СУ-9-18)	Туф (СУ-21-18)	Алевролит (СУ-32-18)	Песчаник (СУ-39-18)	Гранит (СУ-55-18)	Среднее для углей разреза	Кларк для угля*
Hf	1,18	13,80	4,52	6,58	5,40	1,9	1,2±0,1
Ta	0,08	1,62	0,61	1,03	2,11	0,35	0,26±0,03
W	489,0	13,1	20,3	46,3	15,3	252	1,2±0,2
Tl	4,18	0,475	1,13	1,06	Н.д.	0,5	0,68±0,07
Pb	4,45	20,72	43,49	29,96	94,53	11,9	6,6±0,4
Th	3,97	9,68	17,90	17,78	52,57	7,3	3,3±0,2
U	26,46	4,22	7,11	5,47	37,60	12,5	2,9±0,3

* По: Ketrus M.P., Yudovich Ya.E. [16].

Выводы

По результатам нашего исследования установлено отсутствие в угленосных отложениях и гранитах минералов-носителей германия и таких сопутствующих ему элементов, как W, Sb, As. Это свидетельствует о том, что миграция указанных элементов в угли происходила преимущественно гидрогенным путем, т. е. в растворенном (ионном) виде. На это указывают и аномально высокие концентрации данных элементов, в частности в ископаемой древесине. Редкоземельные элементы, по-видимому, поступали в угли как гидрогенно, так и кластогенно, что подтверждается присутствием РЭЭ-минералов (монацита, ксенотима, ортита и др.) в коре выветривания и осадочных отложениях. Золото, вероятно, поступало преимущественно кластогенным способом, однако нельзя исключить и возможность аутигенной минерализации. Таким образом, результаты проведенного исследования подтверждают гипергенную (инфилтратационную) модель образования германиеносных углей Павловского месторождения [9]. Согласно этой модели, германий и основные сопутствующие ему элементы поступали в угленосные толщи почти исключительно в виде растворов, образовавшихся при инфильтрации коры выветривания грейзенизированных редкometалльных гранитов вознесенского комплекса, с последующим накоплением в палеоторфяниках, и формированием металлоносных углей.

СПИСОК ИСТОЧНИКОВ

- Середин В.В. Аномальные концентрации элементов-примесей в месторождении германия Спецугли (Павловское буроугольное месторождение, Южное Приморье). Сообщение 1. Сурьма // Литология и полезные ископаемые. 2003. № 2. С. 183–191.
- Середин В.В. Аномальные концентрации элементов-примесей в месторождении германия Спецугли (Павловское буроугольное месторождение, Южное Приморье). Сообщение 2. Рубидий и цезий // Литология и полезные ископаемые. 2003. № 2. С. 279–287.
- Середин В.В. Au–PGE-минерализация на территории Павловского буроугольного месторождения, Приморье // Геология рудных месторождений. 2004. Т. 46, № 1. С. 43–73
- Середин В.В., Данильчева Ю.А., Магазина Л.О., Шарова И.Г. Германиеносные угли Лузановского грабена (Павловское буроугольное месторождение, Южное Приморье) // Литология и полезные ископаемые. 2006. № 3. С. 311–335.
- Середин В.В. Месторождения германия // Крупные и суперкрупные рудные месторождения / под ред. Н.П. Лаверова, Д.В. Рундквиста. М.: ИГЕМ РАН, 2006. Т. 3, Кн. 2. С. 707–736.

6. Седых А.К. Кайнозойские рифтогенные впадины Приморья (геологическое строение, минерагения и геодинамика углегенеза). Владивосток: Дальнаука, 2008. 248 с.
7. Чекрыжов И.Ю., Трач Г.Н., Нечаев В.П., Трач Д.А. Проявления редкоземельной минерализации в Южном Приморье, Дальний Восток России // Горный журнал. 2018. № 2. С. 35–40.
8. Вялов В.И., Наставкин А.В., Шишов Е.П. Особенности распределения сопутствующих германию промышленно ценных микроэлементов в углях Павловского месторождения (участок Спецугли) // Химия твердого топлива. 2021. № 1. С. 17–28.
9. Arbuzov S.I., Ilenok S.S., Soktoev B.R., Chekryzhov I.Yu., Popov N.Yu., Spears D.A. Geology, geochemistry, mineralogy and genesis of the Spetsugli high-germanium coal deposit in the Pavlovsk coalfield, Russian Far East // Ore Geology Reviews. 2021. Vol. 139. 104537.
10. Павлюткин Б.И. Стратиграфия палеоген-неогеновых отложений Приморья. Владивосток: Дальнаука, 2010.
11. Павлюткин Б.И., Петренко Т.И., Чекрыжов И.Ю. Палеоген-неогеновая граница в Приморье (Дальний Восток России) // Тихоокеанская геология. 2018. Т. 37, № 2. С. 43–58.
12. Павлюткин Б.И., Петренко Т.И., Чекрыжов И.Ю. Проблемы стратиграфии третичных отложений Павловского угольного поля (Приморье) // Тихоокеанская геология. 2005. Т. 24, № 6. С. 59–76.
13. Государственная геологическая карта Российской Федерации. Масштаб 1:200 000 (второе поколение). СПб.: Картографическая фабрика ВСЕГЕИ, 2016. Листы L-53-XXXI и K-53-I. Вознесенская площадь.
14. Арбузов С.И., Чекрыжов И.Ю., Ильенок С.С., Соктоев Б.Р., Соболева Е.Е. Новые данные о геохимии и условиях образования германий-угольного месторождения Спецугли (Приморский край) // Известия ТПУ. Инженеринг георесурсов. 2021. Т. 332, № 5. С. 17–38.
15. Середин В.В., Магазина Л.О. Минералогия и геохимия ископаемой древесины Павловского буруоугольного месторождения (Приморье) // Литология и полезные ископаемые. 1999. № 2. С. 158–173.
16. Ketrus M.P., Yudovich Ya.E. Estimations of Clarkes for Carbonaceous biolithes: world average for trace element contents in black shales and coals // International Journal of Coal Geology. 2009. Vol. 78. P. 135–148.

REFERENCES

1. Seredin V.V. Anomalous concentrations of impurity elements in the German deposit Special coal (Pavlovskoye lignite deposit, Southern Primorye). Message 1. Antimony. *Lithology and Minerals*. 2003; (2):183–191. (In Russ.).
2. Seredin V.V. Anomal'nye kontsentratsii ehlementov-primesei v mestorozhdenii germaniya Spetsugli (Pavlovskoe burougol'noe mestorozhdenie, Yuzhnoe Primor'e). Soobshchenie 2. Rubidii i tsezii. Litologiya i Poleznye Iskopaemye. 2003;(2):279–287. (In Russ.).
3. Seredin V.V. Au–PGE-mineralizatsiya na territorii Pavlovskogo burougol'nogo mestorozhdeniya, Primor'e. *Geology of Ore Deposits*. 2004;46(1):43–73. (In Russ.).
4. Seredin V.V., Danil'cheva Yu.A., Magazina L.O., Sharova I.G. Germanienosnye ubli Luzanovskogo grabena (Pavlovskoe burougol'noe mestorozhdenie, Yuzhnoe Primor'e). *Litologiya i Poleznye Iskopaemye*. 2006;(3):311–335. (In Russ.).
5. Seredin V.V. Mestorozhdeniya germaniya. In: *Krupnye i superkrupnye rudnye mestorozhdeniya*. Moscow: IGEM RAN; 2006. Vol. 3, Book 2. P. 707–736. (In Russ.).
6. Sedykh A.K. Kainozoiskie riftogennye vpadiny Primor'ya (geologicheskoe stroenie, minerageniya i geodinamika uglegeneza). Vladivostok: Dal'nauka; 2008. 248 p. (In Russ.).
7. Chekryzhov I.Yu., Trach G.N., Nечаев В.П., Трач Д.А. Проявления редкоземельной минерализации в Южном Приморье, Дальний Восток России. *Gornyi Zhurnal*. 2018;(2):35–40. (In Russ.).
8. Vyalov V.I., Nastavkin A.V., Shishov E.P. Osobennosti raspredeleniya soputstvuyushchikh germaniyu promyshlenno tsennyykh mikroehlementov v uglyakh Pavlovskogo mestorozhdeniya (uchastok Spetsugli). *Khimiya Tverdogo Topliva*. 2021;(1):17–28. (In Russ.).
9. Arbuzov S.I., Ilenok S.S., Soktoev B.R., Chekryzhov I.Yu., Popov N.Yu., Spears D.A. Geology, geochemistry, mineralogy and genesis of the Spetsugli high-germanium coal deposit in the Pavlovsk coalfield, Russian Far East. *Ore Geology Reviews*. 2021;139:104537.
10. Pavlyutkin B.I. Stratigrafiya paleogen-neogenovyx otlozhenii Primor'ya. Vladivostok: Dal'nauka; 2010. (In Russ.).

11. Pavlyutkin B.I., Petrenko T.I., Chekryzhov I.Yu. Paleogen-neogenovaya granitsa v Primor'e (Dal'niy Vostok Rossii). *Tikhookeanskaya Geologiya*. 2018;37(2):43–58. (In Russ.).
12. Pavlyutkin B.I., Petrenko T.I., Chekryzhov I.Yu. Problemy stratigrafii tretichnykh otlozhenii Pavlovskogo ugol'nogo polya (Primor'e). *Tikhookeanskaya Geologiya*. 2005;24(6):59–76. (In Russ.).
13. Gosudarstvennaya geologicheskaya karta Rossiiskoi Federatsii. Masshtab 1:200 000 (vtoroe pokolenie). Listy L-53-XXXI i K-53-I. Voznesenskaya ploshchad'. Saint Petersburg: Kartograficheskaya fabrika VSEGEI; 2016. (In Russ.).
14. Arbuzov S.I., Chekryzhov I.Yu., Il'enok S.S., Soktoev B.R., Soboleva E.E. Novye dannye o geokhimi i usloviyah obrazovaniya germanii-ugol'nogo mestorozhdeniya Spetsugli (Primorskii krai). *Izvestiya TPU. Inzhiniring Georesursov*. 2021;332(5):17–38. (In Russ.).
15. Seredin V.V., Magazina L.O. Mineralogiya i geokhimiya iskopaemoi drevesiny Pavlovskogo burougol'nogo mestorozhdeniya (Primor'e). *Litologiya i Poleznye Iskopaemye*. 1999;(2):158–173. (In Russ.).
16. Ketris M.P., Yudovich Ya.E. Estimations of Clarkes for Carbonaceous biolithes: world average for trace element contents in black shales and coals. *International Journal of Coal Geology*. 2009;78:135–148.

Научная статья

УДК 550.4:556.314(571.6)

DOI: 10.7868/S3034530825050057

Геохимическая характеристика термального месторождения Бысса (Дальний Восток, Россия)

А.А. Павлов[✉], И.В. Брагин, Г.А. Челноков, Н.А. Харитонова

Андрей Андреевич Павлов

младший научный сотрудник, аспирант

Дальневосточный геологический институт ДВО РАН, Владивосток, Россия

Andreyupavlov792@gmail.com

<https://orcid.org/0000-0002-8793-4871>

Иван Валерьевич Брагин

кандидат геолого-минералогических наук, старший научный сотрудник

Дальневосточный геологический институт ДВО РАН, Владивосток, Россия

bragin_ivan@mail.ru

<https://orcid.org/0000-0003-3280-716X>

Георгий Алексеевич Челноков

кандидат геолого-минералогических наук, ведущий научный сотрудник

Геологический институт РАН, Москва, Россия

geowater@mail.ru

<https://orcid.org/0000-0001-6020-9277>

Наталья Александровна Харитонова

доктор геолого-минералогических наук, главный научный сотрудник

Дальневосточный геологический институт ДВО РАН, Владивосток, Россия

tchenat@mail.ru

<https://orcid.org/0000-0002-0855-3385>

Аннотация. В статье представлены новые и оригинальные данные по геохимии и условиям формирования низкоэнталпийных термальных вод, встречающихся в невулканической зоне Дальнего Востока России. Геологические и структурные условия были рассмотрены в контексте создания гидрологических условий для глубокого проникновения в литосферу и нагрева через локальный геотермический градиент. Изучаемая вода характеризуется составом $\text{Na}-\text{Cl}-\text{HCO}_3$, низкой минерализацией (0,28 г/л), высокими концентрациями кремния и фтора, а также Li, B, Si, Ga, Ge, Rb, Sr, Cs, Mo и W. Спектры распределения редкоземельных элементов также показывают условия формирования термальных вод месторождения Бысса.

Ключевые слова: термальные воды, гидрогохимия, редкоземельные элементы, Бысса, Дальний Восток России

Для цитирования: Павлов А.А., Брагин И.В., Челноков Г.А., Харитонова Н.А. Геохимическая характеристика термального месторождения Бысса (Дальний Восток, Россия) // Вестн. ДВО РАН. 2025. № 5. С. 67–77. <http://dx.doi.org/10.7868/S3034530825050057>

Благодарности. Авторы выражают глубокую благодарность **Кулакову Валерию Викторовичу** за помощь в поиске и предоставлении наиболее современных данных по месторождению Бысса.

Финансирование. Работа выполнена в рамках государственного задания Министерства науки и высшего образования России для ДВГИ ДВО РАН.

Original article

Geochemical characteristics of the Byssa thermal deposit (Far East, Russia)

A.A. Pavlov, I.V. Bragin, G.A. Chelnokov, N.A. Kharitonova

Andrey A. Pavlov

Junior Researcher, Graduate Student
Far East Geological Institute, FEB RAS, Vladivostok, Russia
Andreypavlov792@gmail.com
<https://orcid.org/0000-0002-8793-4871>

Ivan V. Bragin

Candidate of Sciences in Geology and Mineralogy, Senior Researcher
Far East Geological Institute, FEB RAS, Vladivostok, Russia
bragin_ivan@mail.ru
<https://orcid.org/0000-0003-3280-716X>

Georgy A. Chelnokov

Candidate of Sciences in Geology and Mineralogy, Leading Researcher
Geological Institute, RAS, Moscow, Russia
geowater@mail.ru
<https://orcid.org/0000-0001-6020-9277>

Natalia A. Kharitonova

Doctor of Sciences in Geology and Mineralogy, Chief Researcher
Far East Geological Institute, FEB RAS, Vladivostok, Russia
tchenat@mail.ru
<https://orcid.org/0000-0002-0855-3385>

Abstract. The paper presents new and original data on geochemistry and formation conditions of low-enthalpy thermal water occurring in non-volcanic area of the Russian Far East. Geological and structural settings had been discussed in the scope of creating hydrological conditions to deep penetration into the lithosphere and heating up via local geothermal gradient. Studied water is characterized with Na–Cl–HCO₃ composition, low TDS (0,28 g/L), high concentrations of silicon and fluoride as well as Li, B, Si, Ga, Ge, Rb, Sr, Cs, Mo and W. REE patterns show conditions of formation of thermal waters of the Byssa deposit.

Keywords: thermal waters, hydrogeochemistry, rare earth elements, Byssa, Russian Far East

For citation: Pavlov A.A., Bragin I.V., Chelnokov G.A., Kharitonova N.A. Geochemical characteristics of the Byssa thermal deposit (Far East, Russia). *Vestnik of the FEB RAS*. 2025;(5):67–77. (In Russ.). <http://dx.doi.org/10.7868/S3034530825050057>

Acknowledgments. The authors express their deep gratitude to **Кулакову Валерию Викторовичу** for his assistance in searching for and providing the most up-to-date data on the Byssa deposit.

Funding. The work has been completed within the framework of the state assignment of the Ministry of Science and Higher Education of Russia for the Far East Geological Institute, FEB RAS.

Введение

Термальные воды дальневосточной окраины Евразии являются уникальными объектами исследования, которые на протяжении многих десятилетий привлекают пристальное внимание многих ученых мира. Формироваться термальные воды могут в областях современного вулканизма (Камчатка, Курильские острова) [1, 2] и в амагматических складчатых поясах [3–7], создавая крупнейшие по запасам и температуре месторождения вод различного как химического, так и газового состава. В рамках решения фундаментальной научной проблемы в настоящее время ведутся комплексные работы по термам Дальнего Востока России [1, 3–7]. Однако на карте термальных вод Дальнего Востока России еще имеются «белые пятна». В пределах Восточно-Буреинского блока известны три группы источников термальных вод: Кульдурское, Быссинское и Тырминское. Кульдурское месторождение эксплуатируется с 1960-х годов и в настоящее время достаточно хорошо изучено [6, 7]. Термальные воды Бысса и Тырма пока остаются малоизученными из-за своей труднодоступности, поэтому в данной работе будут даны краткая характеристика, геологические и гидрогеологические условия и современные данные по геохимии термальных вод Бысса.

Месторождение термальных минеральных вод Бысса расположено в Селемджинском районе Амурской области, в 160 км от устья р. Быссы. Добраться до него можно либо только на вездеходе по зимнику, либо летом в периоды высокой и средней воды – на малотоннажном катере. Первые сведения об источнике появились в 1916 г., и только в 1970–1971 гг. было проведено разведочное бурение, а в 1993 г. подсчитаны и поставлены на охрану ресурсные запасы минеральных термальных вод [8, 9]. Площадь месторождения составляет около 0,68 км², на нем пробурено около десяти скважин (эксплуатационных и наблюдательных). На сегодняшний день месторождение используется только местным населением, в основном в зимнее время в виде ванн. Вода в ванны закачивается мотопомпами непосредственно из центральной эксплуатационной скважины. Поскольку бальнеологическое заключение на использование воды отсутствует, больные, страдающие заболеваниями суставов и кожи, самостоятельно назначают себе лечение по аналогии с кульдурским типом вод [6], к которому относятся исследуемые источники. Однако полученные нами в 2022 г. данные несколько отличаются от опубликованных ранее, особенно до 1980-х годов (см. таблицу ниже). Это может быть обусловлено следующими причинами: 1) несовершенством методов отбора проб, консервации, подготовки или анализа; 2) изменчивостью химического состава вод.

Целью работы является определение состава месторождения термальных вод Бысса с использованием новейших достижений аналитической техники и установление условий их формирования. Для достижения поставленной цели требовалось решить следующие задачи: 1) определить состав вод (макро- и микроэлементов) и изотопных отношений в них; 2) провести геохимическую типизацию изученных терм; 3) выяснить генезис термальных вод; 4) установить особенности формирования химического состава термальных вод.

Структурно-геологические условия

В геолого-структурной палитре района месторождение Бысса расположено в северной части Туранского блока Буреинского массива на его стыке с Амуро-Зейской впадиной, в восточной части Норско-Сухотинского прогиба и приурочено к Кульдуро-Быссинской термальной линии, вытянутой в субмеридиональном направлении. Месторождение характеризуется интенсивным развитием тектонических процессов, сформировавших сложную систему разрывных нарушений. Природный источник разгрузки термоминеральных вод (источник Бысса) локализован в зоне регионального Быссинского разлома субширотно-северо-восточного направления (рис. 1).

Формирование ресурсов подземных вод на данной территории определяется крупнейшим Туранским разломом [10]. Выходы термальных вод расположены на левобережье р. Быссы в пределах низкой поймы, которая затапливается во время паводков. Мощность современных отложений, представленных здесь песками, составляет 12–13 м. Ниже по

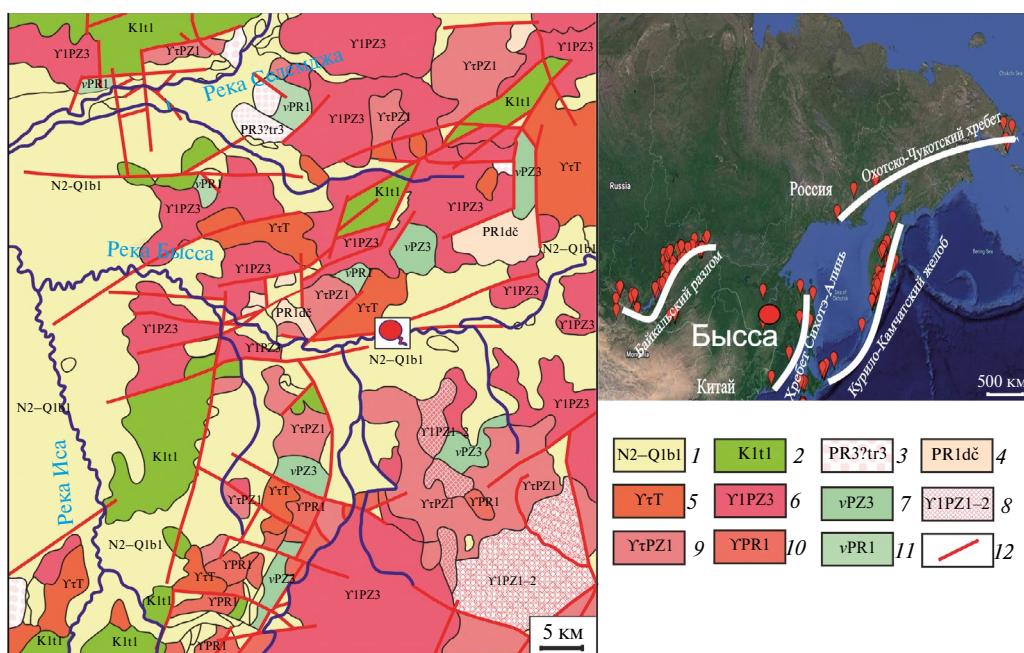


Рис. 1. Геолого-структурное положение месторождения термальных вод Бысса по данным работ [9, 11] с изменениями авторов. 1 – белогорская свита: пески, глины, галечники, алевриты; 2 – талдан-ская свита: андезиты и их туфы, андезито-базальты, песчаники, конгломераты, туфоконгломераты, туфопесчаники, алевролиты, алевролиты и угольные пласти; 3 – туранская серия: расчлененные и кальцитированные песчаники, конгломерато-брекчии, гравелиты, конгломераты, микросланцы, слюдисто-полевошпат-кварцевые сланцы и кварциты; 4 – Дичуньская свита: амфиболиты, рого-вообманковые, биотитовые и двуслюдянные гнейсы, роговообманковые кристаллические сланцы, кварциты и мраморы; 5 – розовые лейкократовые граниты от крупно- до мелкозернистых, дайки аплитов, пегматитов и гранитов; 6 – серые биотитовые граниты средне- и крупнозернистые, пор-фировидные гранодиориты, дайки аплитов, пегматитов и гранитов; 7 – габбро, габбро-диориты и диориты; 8 – биотитовые граниты мелко- и среднезернистые катаклазированные, дайки пег-матитов и гранитов; 9 – биотитовые и лейкократовые граниты, плагиограниты и гранодиориты катаклазированные, дайки гранитов; 10 – граниты биотитовые, мелко- и среднезернистые гней-совидные граниты; 11 – габбро и габбро-диабазы, дайки диабазовых порфиритов и перидотитов; 12 – тектонические контакты

разрезу залегают песчано-галечные отложения белогорской свиты мощностью 20 м. Под воздействием фильтрующихся термальных вод эти отложения местами, особенно в основании свиты, преобразуются в плотные пористые слабопиритизированные породы с кремнистым цементом. Аллювиальные образования залегают на позднепалеозойских габбро-диоритах, которые слагают крупный ксенолит, вытянутый в субширотном направлении вдоль р. Быссы. Он рассечен многочисленными дайками и жилами позднепалеозойских гранитоидов мощностью от первых сантиметров до 10 м. Непосредственно под аллювиальными отложениями габбро-диориты преобразуются в глинистые отложения коры выветривания мощностью 4 м. Ниже они становятся плотными, но вместе с жильными гранитоидами, часто цеолитизированы и гематизированы, местами сильно трещиноваты и содержат много тонких прожилок кальцита и опалесцирующего кварца с вкрапленниками пирита. Севернее источника Быссы, на правом берегу реки, расположен массив триасовых лейкократовых гранитов. Источник разгрузки термальных вод приурочен к тектоническому нарушению, разделяющему эти граниты с биотитовыми гранитами и габбро-диоритами. Этот выводящий разлом относится к системе разломов близширотного простириания. Он выделяется наземной магнитометрией и мощными (до 10 м) зонами дробления и интенсивной трещиноватости в скважинах. Ширина отдельных трещин в этих зонах достигает 3 см. Они открыты либо заполнены кальцитом, цеолитами, опалесцирующим кварцем или халцедоном [9].

Методы исследований

Методологическая работа повторяет исследования, проведенные нами ранее на других объектах минеральных вод [1, 3–6, 12–16]. В полевой сезон 2022 г. нами были отобраны пробы воды для ионного и микроэлементного анализа. Параллельно измерялись нестабильные параметры воды (температура, электропроводность, pH, Eh). Пробы пропускались через мембранные фильтры с размером ячеек 0,45 мкм для отделения растворенных веществ от взвешенных веществ. Далее пробы на катионы и микрокомпоненты подкислялись сверхчистой азотной кислотой до 2%, пробы на анионы и стабильные изотопы оставлялись неокисленными. Все аналитические работы выполнялись непосредственно в ДВГИ ДВО РАН, а именно в Приморском центре локального элементного и изотопного анализа. Катионы и анионы определяли на жидкостном хроматографе Shimadzu LC-20, микроэлементы и металлы – на масс-спектрометре Agilent 7700 и атомно-эмиссионном спектрометре с индуктивно связанный плазмой ICAP 6500 Duo. Для определения содержания РЗЭ в фильтрате использовали метод ИСП-МС. При обработке полученных аналитических данных использовали способ математического устранения помех оксидов и гидроксидов на аналитических массах РЗЭ при прямом определении их низких содержаний методом ИСП-МС [17]. Концентрации редкоземельных элементов нормировали к значениям в NASC. Для расчета температуры глубинного резервуара использовались формулы кварцевого (1) и халцедонового (2) геотермометров [18], основывающиеся на значениях концентрации кремния в термальной воде:

$$T = 1309 / (5,19 - \lg [\text{SiO}_2]) - 273,15; \quad (1)$$

$$T = 1032 / (4,69 - \lg [\text{SiO}_2]) - 273,15. \quad (2)$$

Для оценки условий формирования термальных вод были рассчитаны аномалии церия и европия, а также наклон тренда (TS) распределения РЗЭ по формулам

$$\text{Ce}^* = 1 - ([\text{La}_n] + [\text{Pr}_n]) / 2[\text{Ce}_n];$$

$$\text{Eu}^* = 1 - ([\text{Sm}_n] + [\text{Gd}_n]) / 2[\text{Eu}_n];$$

$$\text{TS} = 1 - ([\text{Ce}_n] + [\text{Nd}_n] + [\text{Eu}_n]) / ([\text{Dy}_n] + [\text{Er}_n] + [\text{Yb}_n]),$$

где REE_n – нормированная по NASC концентрация редкоземельного элемента.

Значения аномалий могут находиться в диапазоне от –1 до +1, где отрицательные и положительные значения элементных аномалий будут соответствовать впадине или горбу на тренде нормированного распределения, а значение TS будет отражать наклон тренда в сторону тяжелых или легких РЗЭ соответственно. Известно, что количество РЗЭ в природной среде распределено не равномерно, а имеет пилообразную форму, поэтому для расчета наклона тренда использовались по три элемента легких и тяжелых РЗЭ с наибольшей распространенностью.

По химическому составу (см. таблицу) можно сделать вывод, что исследованные термальные воды являются низкоэнталпийными ($T = 42$ °C), щелочными, маломинерализованными ($\text{TDS} = 0,27$ г/л), относятся к типу $\text{Na}-\text{Cl}-\text{HCO}_3$ с повышенным содержанием кремния и фтора ($[\text{Si}] = 32$ ppm, $[\text{F}^-] = 10,3$ мг/л), образовались в резко восстановительных условиях ($\text{Eh} < -40$ мВ). Такой состав характерен для термальных вод, образовавшихся в кристаллических породах вне зоны современной вулканической активности. Повышенное содержание фтора характерно для вод, образовавшихся в кислых магматических породах, так как последние часто содержат в своем минеральном составе фторапатит или флюорит, являющиеся источником этого элемента. Из-за отсутствия влияния осадочных пород на состав вод количество сульфат-иона довольно низкое. Среди катионов преобладает натрий, а концентрации кальция и магния очень низкие (для последнего близки к пределу обнаружения методом ионной хроматографии – 0,1 мг/л).

Химический состав термальных минеральных и поверхностных пресных
вод месторождения Бысса

Таблица

Параметр	Ед. измер.	Источник данных		Скважины (n = 6)	Реки (n = 5)
		Андреев, 1993 [8]	Кулаков, 2011 [7]		
T	°C	42–43	42	20,5–41,2	5,4–8,9
T*		—		86–88	—
T**		—		115–117	—
pH	—	7,62–9,7	9,3	9,7–10,1	6,7–7,1
Eh	мВ	—		–345...–40	76–248
[K ⁺]	мг/л	1,25–3	1,4	1,1–1,6	0,4–0,8
[Na ⁺]		52–68	67,8	59,8–63,2	1,2–5,6
[Ca ²⁺]		2–4,7	3,2	1,3–3	2,8–4,4
[Mg ²⁺]		0,1–3,65	0,3	0,3	0,3–1,3
[Cl [–]]		3–35,5	36	25,8–31,3	0,6–2,2
[SO ₄ ^{2–}]		2–25	16	22,2–23,5	1–4
[HCO ₃ [–]]		24,4–73,3	38	54,1–70	16,2–21,5
[F [–]]		8	9	9,3–10,3	<0,3
CAI-1	—	—		–2,2...–2,7	–2,3...–7,2
CAI-2		—		–1,2...–1,3	–0,2...–0,6
Si	ppm	13,5–33	31,2	31–32	3,4–6,3
Li	ppb	—		40–46	0,8–1
B		—		153–172	2,2–5,5
Al		—		13–29	219–487
Mn		—		0,7–3,9	16–40
Fe		—		6–25	506–936
Ga		—		1,9–2,2	0,02–0,08
Ge		—		2,4–2,9	0,04–0,07
Rb		—		5,8–6,8	0,5–0,8
Sr		—		59,4–69,5	17,1–26,4
Mo		—		10,6–12,2	0,15–0,34
Cs		—		1,5–1,9	0,01–0,04
Ba		—		1–1,7	5,1–11
W		—		24,2–29,1	0,02–0,05

Примечание. T* и T** – рассчитанные температуры геотермального резервуара с использованием халцедонового и кварцевого геотермометров последовательно.

Следует отметить, что химический состав воды отражает литологический состав вмещающих пород, в частности гранитоидов, за счет гидратации слагающих их минералов (полевых шпатов и плагиоклазов). Отрицательные значения хлорно-щелочных индексов (CAI-1 = -2,4, CAI-2 = -1,3) свидетельствуют о том, что при формировании вод преобладают процессы обратного ионного обмена, приводящие к тому, что концентрация калия и натрия выше, чем магния и кальция. В термальных водах повышенные концентрации микрэлементов, выраженные в ppb, можно отметить для Li (46), B (172), Ga (2,2), Ge (2,9), Rb (6,8), Sr (69,5), Mo (12,2), Cs (1,9), W (29,1). Одни из них характерны для всех типов термальных вод (Li, B, Si, Ga, Ge, Rb, Sr, Cs), другие свидетельствуют о прошлой гидротермальной активности территории (Mo, W). Поведение бария и стронция, с одной стороны, коррелирует с кальцием, а с другой стороны, их накопление в растворе ограничивается образованием их карбонатов, так как по химическому составу воды относятся к гидрокарбонатному типу. Более высокая химическая подвижность алюминия, железа и марганца наблюдается в пресных поверхностных водах, которые способны переносить органическое вещество, а с ним в виде коллоидов и комплексных соединений вышеупомянутые элементы. Совместное присутствие фтора и вольфрама свидетельствует о шеелитовой минерализации вмещающих пород. Хорошая корреляция двух названных элементов (0,95) подтверждает выдвинутые предположения, а также геохимические особенности поведения этих элементов, обладающих повышенной подвижностью в щелочных средах.

Основная сложность изучения данного типа вод связана с крайне низким содержанием в них РЗЭ (доли микрограммов на литр). Результаты по РЗЭ принято представлять не только в виде таблиц концентраций, но и в виде нормированных кривых, которые отображают соотношение концентраций в воде по отношению к выбранной матрице. В литературе встречается нормирование РЗЭ природных вод по отношению к хондриту, сланцу, водоносным породам, морской воде и т. д. в зависимости от целей исследований. Если говорить о конкретных источниках РЗЭ в воде, то для понимания процессов фракционирования РЗЭ в системе вода–порода нормирование следует проводить по отношению к водоносным породам. Сделать это зачастую затруднительно из-за большого петрографического разнообразия водоносных пород, с которыми взаимодействует вода. В этом случае становится затруднительным оценить вклад различных типов пород в общую картину распределения РЗЭ в воде. Кроме того, окружающие породы часто гидротермально изменены, т.е. они фактически уже прореагировали с водами. Кроме того, когда рассматриваются крупные резервуары подземных вод с крупномасштабной циркуляцией в литосфере, трудно определить историю взаимодействия воды и породы, когда и на каком этапе произошло взаимодействие с определенным типом породы. Поэтому, особенно на первом этапе исследований, следует нормализовать по сланцу, примерно отражающему средний состав верхней коры, в которой формируется гидросфера [19–22]. График распределения редкоземельных элементов показан на рис. 2.

Видно, что концентрации РЗЭ в термальных водах (51–89 ppt) более чем в 20 раз ниже, чем в поверхностных водах района (2058–2416 ppt). Это обусловлено щелочной средой подземных термальных вод. Известно, что наиболее высокие концентрации редкоземельных элементов наблюдаются в ультракислых высокотермальных вулканических водах [10]. При этом разброс значений значительно ниже в реках с разными водосборами, чем в семи скважинах, пробуренных на месторождении термальных вод. Это свидетельствует о том, что концентрация и поведение редкоземельных элементов в большей степени зависят от значений физико-химических параметров, чем от химико-минералогического состава вмещающих пород. Для пресных поверхностных вод характерна отрицательная аномалия церия ($-0,13 < Ce < -0,03$), что свидетельствует об окислительных условиях, преобладающих в поверхностных водах ($+76 < Eh < +248$ мВ). Выщелоченный из вмещающих пород церий с ростом окислительно-восстановительного потенциала окисляется до формы Ce^{4+} , доступной для осаждения, комплексообразования и последующего выведения из раствора. Отрицательная аномалия европия ($-0,39 < Eu^* < -0,18$) характерна для пресных поверхностных вод, поскольку европий лучше выщелачивается из плагиоклазов и полевых шпатов при наличии в воде термальной составляющей. В то же время европий и церий в окисленных формах хорошо связываются со взвешенными частицами, железом

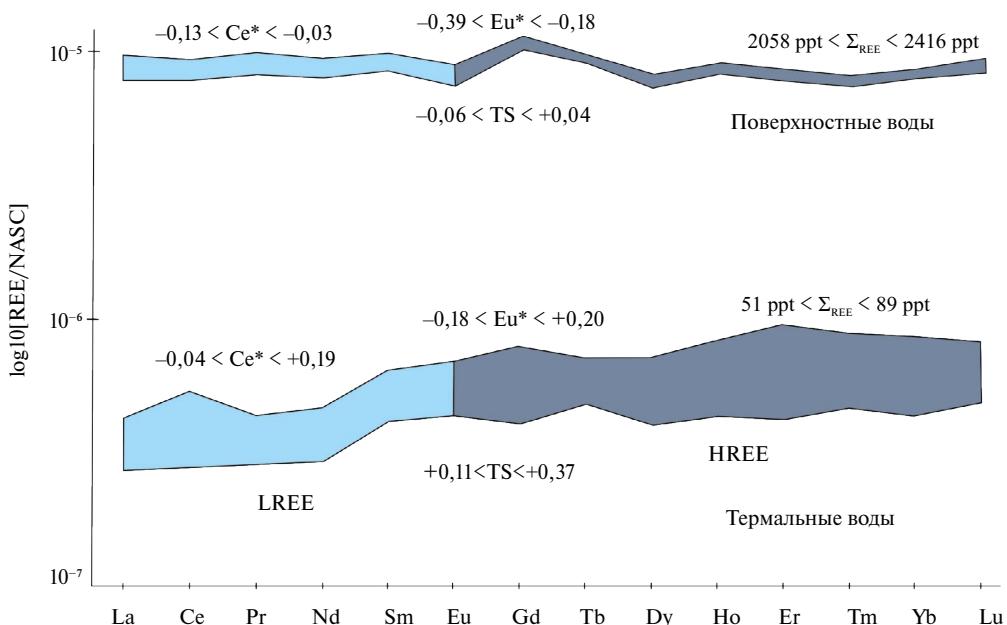


Рис. 2. Поведение редкоземельных элементов в термальных и фоновых водах месторождения Бысса

и марганцем, которых в реках больше (по сравнению с термальными водами). Отсутствие существенного наклона тренда ($-0,06 < TS < +0,04$) также характерно для поверхностных вод и, очевидно, отражает усредненный тренд распределения редкоземельных элементов во вмещающих породах водосбора р. Быссы и ее притоков. Профиль распределения РЗЭ в термальных водах характеризуется наличием положительных аномалий церия и европия ($-0,04 < Ce^* < +0,19$; $-0,18 < Eu^* < +0,20$ соответственно), что характерно для подземных термальных вод с отрицательным окислительно-восстановительным потенциалом ($-345 < Eh < -40$ мВ) и свидетельствует о восстановительных условиях среды, благоприятных для накопления подвижных восстановленных форм редкоземельных элементов [1, 12–16].

Заключение

Термальные водные ресурсы формируются путем инфильтрации метеорных вод, собираемых с обширных площадей в высокогорье. При этом должны быть созданы условия для проникновения воды на большие глубины. Сначала воды поступают в подземный горизонт, обычно это подрусловые воды небольших горных ручьев или рек. Затем в области питания необходим либо один мощный глубинный разлом, либо серия разломов для проникновения воды в нижележащие водоносные горизонты, где происходит прогрев за счет геотермического градиента. В литературе описаны примеры внедрения вод на глубины 5 км и более, при этом локальный базис эрозии (трещиноватая зона) часто заканчивается первыми десятками метров. Водоносный горизонт локального базиса эрозии обычно ограничен снизу коренными породами, а при наличии задерноватой поверхности – слоем терригенных осадков в виде глин и суглинков сверху. Выход вод всегда приурочен к зоне разлома. Поднимаясь на поверхность, термальные воды смешиваются с грунтовыми водами местного фундамента и таким образом разбавляются. На поверхности важными маркерами термального источника являются минерализация, окислительно-восстановительный потенциал и содержание кремния. Повышенное содержание бора, брома, хлора и сульфатов будет зависеть от состава пород, точнее от наличия в них осадочных терригенных отложений; повышенная концентрация фтора снова будет указывать на наличие кислых интрузий во вмещающих породах, содержащих среди акцессорных минералов фторапатит или флюо-

рит. Расход источника можно определить по глубине циркуляции (но тогда геотермометры должны показывать эту разницу), расстоянию между зонами загрузки и разгрузки, соотношению расстояний между зонами загрузки и разгрузки. Чем больше объем породы, через которую необходимо пропустить воду, тем большее гидродинамическое сопротивление порода будет оказывать воде.

Таким образом, изученные термальные воды приурочены к зонам неотектонических разломов в палеозойских интрузивных породах кислого состава и характеризуются низкой минерализацией, щелочной средой, кремнистым хлоридно-гидрокарбонатным натриевым составом с повышенным содержанием фтора, а также некоторых микроэлементов, отражающих как термальную составляющую взаимодействия вода–порода, так и трассирующие ореолы рассеяния рудных зон. Уникальные гидрогеологические условия создали предпосылки для формирования крупного для региона месторождения термальных вод, прогнозные ресурсы которого позволяют использовать термы в бальнеологических целях (был создан курорт на 200–300 мест). В лечебно-профилактических целях вода применяется наружно, в виде ванн для профилактики и лечения болезней системы кровообращения, нервной системы, опорно-двигательного аппарата, болезней эндокринной системы.

СПИСОК ИСТОЧНИКОВ

1. Чудаев О.В., Челноков Г.А., Брагин И.В., Харитонова Н.А., Рычагов С.Н., Нуждаев А.А., Нуждаев И.А. Геохимические особенности поведения основных и редкоземельных элементов в Паратунской и Большебанной гидротермальных системах Камчатки // Тихоокеанская геология. 2016. Т. 35 (6). С. 102–119.
2. Иванов В.В. Гидротермальные системы современных вулканических районов Камчатки и Курильских островов // Труды Лаборатории вулканологии АН СССР. 1956. Т. 12. С. 197–217.
3. Bragin I.V., Chelnokov G.A., Chudaev O.V., Kharitonova N.A., Vysotskiy S.V. Geochemistry of thermal waters of continental margin of Far East of Russia // Acta Geol. Sin. 2016. Vol. 90. P. 276–284.
4. Челноков Г.А., Калитина Е.Г., Брагин И.В., Харитонова Н.А. Гидрогеохимия и генезис термальных вод источника Горячий Ключ, Приморье (Дальний Восток России) // Тихоокеанская геология. 2014. Т. 32, № 6. С. 99–110.
5. Chelnokov G., Bragin I., Kharitonova N., Alexandrov I., Ivin V., Chelnokova B. Geochemistry and conditions of the formation of the Ulsk thermal spring (coasts of the Sea of Okhotsk, Khabarovsk krai) // Russian Journal of Pacific Geology. 2019. Vol. 13. P. 163–175.
6. Харитонова Н.А., Лямина Л.А., Брагин И.В., Карабцов А.А., Тарасенко И.А., Челноков Г.А., Накамура Х., Ивамори Х. Химический и изотопный состав азотных термальных вод месторождения Кульдур (ЕАО, Россия) // Вестник Московского университета. Серия 4. Геология. 2020. № 5. С. 77–91.
7. Кулаков В.В. Геохимия подземных вод Приамурья. Хабаровск: ИВЭП ДВО РАН, 2011. 254 с.
8. Андреев А.И. Отчет о результатах детальной разведки Бысского месторождения термоминеральных вод с подсчетом эксплуатационных запасов по состоянию на 10.03.1993 г. 1993.
9. Батюков С.И., Чаплыгина Л.И., Артеменко Е.Г. Отчет о генеральных поисках гидротерм в восточной части зоны БАМ в 1979–80 гг. Хабаровск, 1980.
10. Гильманова Г.З., Забродин В.Ю., Рыбас О.В. Разломная тектоника материковой части Дальнего Востока России. Владивосток: Дальнаука, 2015. 126 с.
11. Термальные источники. URL: <https://thermalsprings.ru/> (дата обращения: 28.06.2025).
12. Bragin I.V., Chelnokov G.A., Kharitonova N.A., Veldemar A.A., Pavlov A.A. Rare-earth elements and isotopic geochemistry of thermal waters of the Okhotsk sea shore, Far East of Russia // IOP Conf. Ser. Earth Environ. Sci. 2020. Vol. 467. 012092. <https://doi.org/10.1088/1755-1315/467/1/012092>
13. Челноков Г.А., Харитонова Н.А., Брагин И.В., Асеева А.В., Бушкарева К.Ю., Лямина Л.А. Геохимия редкоземельных элементов в водах и вторичных минеральных отложениях термальных источников Камчатки // Вестник Московского университета. Серия 4. Геология. 2020. № 1. С. 88–96.
14. Чудаев О.В., Харитонова Н.А., Челноков Г.А., Брагин И.В., Калитина Е.Г. Геохимические особенности поведения редкоземельных элементов в водах Дальнего Востока России в условиях природных и антропогенных аномалий. Владивосток: Дальнаука, 2017. 152 с.

15. Чудаев О.В., Челноков Г.А., Брагин И.В., Харитонова Н.А., Блохин М.Г., Александров И.А. Фракционирование редкоземельных элементов в реках Восточного и Южного Сихотэ-Алиня в условиях природных и антропогенных аномалий // Тихоокеанская геология. 2015. Т. 34 (6). С. 34–44.
16. Харитонова Н.А., Вах Е.А., Челноков Г.А., Чудаев О.В., Александров И.А., Брагин И.В. Геохимия редкоземельных элементов в подземных водах Сихотэ-Алинской складчатой области (Дальний Восток России) // Тихоокеанская геология. 2016. Т. 35 (2). С. 68–82.
17. Еловский Е.В. Математическое устранение спектральных помех при прямом определении редкоземельных элементов в природных водах методом квадрупольной масс-спектрометрии с индуктивно связанный плазмой // Журнал аналитической химии. 2015. Т. 70 (14). С. 1654–1663.
18. Fournier R.O. Chemical geothermometers and mixing models for geothermal systems // *Geothermics*. 1977. Vol. 5. P. 41–50.
19. Michard A. Rare earth element systematics in hydrothermal fluids // *Geochimica et Cosmochimica Acta*. 1989. Vol. 53. P. 745–750.
20. Moller P. The behavior of REE and Y in water-rock interactions // *Water-Rock Interaction. Proceedings of the 10th International Symposium*. 2001. Vol. 2. P. 989–992.
21. Sholkovitz E.R. The aquatic chemistry of rare earth elements in rivers and estuaries // *Aquatic Geochemistry*. 1995. Vol. 1 (1). P. 1–34.
22. Wood S.A. The aqueous geochemistry of the rare-earth elements and yttrium. 1. Review of available low-temperature data for inorganic complexes and the inorganic REE speciation of natural waters // *Chemical Geology*. 1990. Vol. 82. P. 159–186.

REFERENCES

1. Chudaev O.V., Chelnokov G.A., Bragin I.V., Kharitonova N.A., Rychagov S.N., Nuzhdaev A.A., Nuzhdaev I.A. Geochemical features of major and rare-earth element behavior in the Paratunka and Bol'shebannyi hydrothermal systems of Kamchatka *Russ. J. Pac. Geol.* 2016;10:458–475.
2. Ivanov V.V. Hydrothermal systems of modern volcanic areas of Kamchatka and Kuril islands. *Trudy Laboratori Vulkanologii Akademii Nauk SSSR*. 1956;12:197–217. (In Russ.).
3. Bragin I.V., Chelnokov G.A., Chudaev O.V., Kharitonova N.A., Vysotskiy S.V. Geochemistry of thermal waters of continental margin of Far East of Russia. *Acta Geol. Sin.* 2016;90: 276–284.
4. Chelnokov G.A., Kalitina E.G., Bragin I.V., Kharitonova N.A. Hydrochemistry and genesis of thermal waters of the Goryachii Klyuch spring in Primorskii Krai (Far East of Russia). *Russian Journal of Pacific Geology*. 2014;8(6):475–488.
5. Chelnokov G., Bragin I., Kharitonova N., Alexandrov I., Ivin V., Chelnokova B. Geochemistry and conditions of the formation of the Ulsk thermal spring (coasts of the Sea of Okhotsk, Khabarovsk krai). *Russian Journal of Pacific Geology*. 2019;13:163–175.
6. Kharitonova N.A., Lyamina L.A., Bragin I.V., Karabtsov A.A., Tarasenko I.A., Chelnokov G.A., Nakamura H., Iwamori H. The chemical and isotope composition of nitrogen thermal groundwaters of the Kuldur spa (Jewish Autonomous Region, Russia). *Moscow University Geology Bulletin*. 2020;75(6):621–635.
7. Kulakov V.V. Geochemistry of groundwater of the Amur region. Khabarovsk: IWEP FEB RAS; 2011. 254 p. (In Russ.).
8. Andreev A.I. Report on the results of detailed exploration of the Byssa field of thermal mineral waters with the calculation of operational reserves as of 10.03.1993. 1993. (In Russ.).
9. Batyukov S.I., Chaplygina L.I., Artemenko E.G. Report on general searches for hydrotherms in the eastern part of the BAM zone in 1979–80. Khabarovsk; 1980. (In Russ.).
10. Gil'manova G.Z., Zabrodin V.Y., Rybas O.V. Fault Tectonics of the Continental Part of the Russian Far East. Vladivostok: Dal'nauka; 2015. 126 p. (In Russ.).
11. Thermal springs. (In Russ.). URL: <https://thermalsprings.ru/> (date of access: 28.06.2025).
12. Bragin I.V., Chelnokov G.A., Kharitonova N.A., Veldemar A.A., Pavlov A.A. Rare-earth elements and isotopic geochemistry of thermal waters of the Okhotsk sea shore, Far East of Russia. *IOP Conf. Ser. Earth Environ. Sci.* 2020;467:012092. <https://doi.org/10.1088/1755-1315/467/1/012092>
13. Chelnokov G.A., Kharitonova N.A., Bragin I.V., Aseeva A.V., Bushkareva K.Yu., Liamina L.A. The geochemistry of rare earth elements in natural waters and secondary mineral sediments of thermal fields of Kamchatka. *Moscow University Geology Bulletin*. 2020;75(2):196–204.

14. Chudaev O.V., Kharitonova N.A., Chelnokov G.A., Bragin I.V., Kalitina E.G. Geochemical features of the behavior of rare-earth elements in waters of the Russian Far East under conditions of natural and anthropogenic anomalies. Vladivostok: Dal'nauka; 2017 152 p. (In Russ.).
15. Chudaev O.V., Chelnokov G.A., Bragin I.V., Kharitonova N.A., Blokhin M.G., Aleksandrov I.A. REE fractionation in the rivers of eastern and southern Sikhote Alin with natural and anthropogenic anomalies. *Russian Journal of Pacific Geology*. 2015;9(6):428–438.
16. Kharitonova N.A., Vakh E.A., Chelnokov G.A., Chudaev O.V., Aleksandrov I.A., Bragin I.V. REE geochemistry in groundwater of the Sikhote Alin fold region (Russian Far East). *Russian Journal of Pacific Geology*. 2016;10(2):141–154.
17. Elovskiy E.V. Mathematical elimination of spectral interferences in the direct determination of rare-earth elements in natural waters by inductively coupled plasma quadrupole mass spectrometry. *Journal of Analytical Chemistry*. 2015;70(14):1654–1663. (In Russ.).
18. Fournier R.O. Chemical geothermometers and mixing models for geothermal systems. *Geothermics*. 1977;5:41–50.
19. Michard A. Rare earth element systematics in hydrothermal fluids. *Geochimica et Cosmochimica Acta*. 1989;53:745–750.
20. Moller P. The behavior of REE and Y in water-rock interactions. *Water-Rock Interaction. Proceedings of the 10th International Symposium*. 2001;2:989–992.
21. Sholkovitz E.R. The aquatic chemistry of rare earth elements in rivers and estuaries. *Aquatic Geochemistry*. 1995;1(1):1–34.
22. Wood S.A. The aqueous geochemistry of the rare-earth elements and yttrium. 1. Review of available low-temperature data for inorganic complexes and the inorganic REE speciation of natural waters. *Chemical Geology*. 1990;82:159–186.

НАУКИ О ЗЕМЛЕ
И ОКРУЖАЮЩЕЙ СРЕДЕ

Научная статья

УДК 550.461

DOI: 10.7868/S3034530825050062

Оценка влияния объектов накопленного
вреда на качество источников
нецентрализованного водоснабжения
поселка городского типа Ярославский
(Приморский край, Россия)

А.В. Ветошкина[✉], И.А. Тарасенко, А.С. Холодов, Е.А. Вах

Алена Владимировна Ветошкина

научный сотрудник

Дальневосточный геологический институт ДВО РАН, Владивосток, Россия

vetoshkina.alena@mail.ru

<https://orcid.org/0000-0001-9791-2644>

Ирина Андреевна Тарасенко

доктор геолого-минералогических наук, ведущий научный сотрудник

Дальневосточный геологический институт ДВО РАН, Владивосток, Россия

профессор

Дальневосточный федеральный университет, Владивосток, Россия

tarasenko_irina@mail.ru

<https://orcid.org/0000-0002-4612-0708>

Алексей Сергеевич Холодов

кандидат географических наук, старший научный сотрудник

Дальневосточный геологический институт ДВО РАН, Владивосток, Россия

alex.holodov@gmail.com

<https://orcid.org/0000-0001-6916-0596>

Елена Александровна Вах

кандидат геолого-минералогических наук, старший научный сотрудник

Дальневосточный геологический институт ДВО РАН, Владивосток, Россия

adasea@mail.ru

<https://orcid.org/0000-0002-6690-6505>

Аннотация. В статье рассмотрено влияние накопленных отходов горно-перерабатывающего производства (хвостов обогащения) на качество подземных вод, используемых населением пгт Ярославский (Приморский край) для нецентрализованного водоснабжения. Приведен углубленный анализ гидрогеохимических процессов, определяющих миграцию загрязнителей из хвостов обогащения флюоритовых руд в подземные водоносные горизонты. Выявлено, что воды хвостохранилища обладают повышенной минерализацией и содержат токсичные компоненты (Be, As, Li, Cd и др.), относящиеся к 1–2-му классам опасности. Проведена оценка токсикологического риска: установлено незначительное превышение предельно допустимой концентрации Mn в одном из источников водоснабжения, тогда как

концентрации других контролируемых элементов находятся ниже нормативных уровней. Описаны методы и индикаторы оценки загрязненности подземных вод (сравнение с санитарными нормативами, интегральные индексы загрязнения). Предложены рекомендации по мониторингу и управлению рисками, включая постоянный контроль качества воды, усиление дамб хвостохранилища и профилактику аварийных ситуаций. Сделан вывод, что на данный момент качество исследованных подземных вод удовлетворяет санитарным требованиям, однако сохраняется потенциальный риск загрязнения при нарушении устойчивости хвостохранилища или при экстремальных природных явлениях.

Ключевые слова: хвостохранилище, подземные воды, миграция загрязнителей, токсикологический риск, гидрохимия, мониторинг, Приморский край

Для цитирования: Ветошкина А.В., Тарасенко И.А., Холодов А.С., Вах Е.А. Оценка влияния объектов накопленного вреда на качество источников нецентрализованного водоснабжения поселка городского типа Ярославский (Приморский край, Россия) // Вестн. ДВО РАН. 2025. № 5. С. 78–96. <http://dx.doi.org/10.7868/S3034530825050062>

Финансирование. Работа выполнена в рамках государственного задания Министерства науки и высшего образования России для ДВГИ ДВО РАН.

Original article

Assessment of the impact of the objects of accumulated environmental damage on the quality of the decentralized water supply sources in Yaroslavsky settlement (Primorsky Territory, Russia)

A.V. Vetoshkina, I.A. Tarasenko, A.S. Kholodov, E.A. Vakh

Alyona V. Vetoshkina

Researcher

Far East Geological Institute, FEB RAS, Vladivostok, Russia

vetoshkina.alena@mail.ru

<https://orcid.org/0000-0001-9791-2644>

Irina A. Tarasenko

Doctor of Science in Geology and Mineralogy, Leading Researcher

Far East Geological Institute, FEB RAS, Vladivostok, Russia

Professor

Far Eastern Federal University, Vladivostok, Russia

tarasenko_irina@mail.ru

<https://orcid.org/0000-0002-4612-0708>

Aleksei S. Kholodov

Candidate of Science in Geography, Senior Researcher

Far East Geological Institute, FEB RAS, Vladivostok, Russia

alex.holodov@gmail.com

<https://orcid.org/0000-0001-6916-0596>

Elena A. Vakh

Candidate of Science in Geology and Mineralogy, Senior Researcher

Far East Geological Institute, FEB RAS, Vladivostok, Russia

adasea@mail.ru

<https://orcid.org/0000-0002-6690-6505>

Abstract. This article examines the impact of accumulated mining and processing waste (tailings) on the quality of groundwater used by the population of the Yaroslavsky settlement in Primorsky Territory for non-centralized water supply. It provides an in-depth analysis of the hydrogeochemical processes that determine the migration of pollutants from fluorite ore tailings into groundwater horizons. The study reveals that the mineralization of the tailing dump's waters has increased and they contain toxic components (Be, As, Li, Cd, etc.) belonging to hazard classes 1–2. A toxicological risk assessment was carried out, revealing a slight exceedance of the maximum permissible concentration of Mn in one of the water supply sources, while concentrations of other monitored elements are below normative levels. Methods and indicators for assessing groundwater pollution (e.g. comparison with sanitary norms and integral pollution indices) are described. Recommendations for monitoring and risk management are proposed, including continuous water quality control, tailings dam reinforcement and emergency situation prevention. It is concluded that, currently, the quality of the studied groundwater meets sanitary requirements. However, there is still a potential risk of contamination in the event of tailings dam instability or extreme natural occurrences.

Keywords: tailing dump, groundwater, pollutant migration, toxicological risk, hydrogeochemistry, monitoring, Primorsky Territory

For citation: Vetoshkina A.V., Tarasenko I.A., Kholodov A.S., Vakh E.A. Assessment of the impact of the objects of accumulated environmental damage on the quality of the decentralized water supply sources in Yaroslavsky settlement (Primorsky Territory, Russia). *Vestnik of the FEB RAS*. 2025;(5):78–96. (In Russ.). <http://dx.doi.org/10.7868/S3034530825050062>

Funding. The work was carried out within the framework of the state assignment of the Ministry of Science and Higher Education of the Russian Federation for the Far East Geological Institute, FEB RAS.

Введение

Централизованные системы водоснабжения являются ключевым элементом инфраструктуры современных городов и поселков, обеспечивая население питьевой водой [1]. Однако износ коммуникаций и ухудшение качества водопроводной воды ведут к снижению доверия населения к централизованным источникам водоснабжения. Например, во Владивостоке в 2000–2005 гг. выявлена связь заболеваемости населения с употреблением водопроводной воды, не отвечающей нормативам по ряду показателей [2]. Это обусловило рост интереса населения к альтернативным источникам питьевой воды – прежде всего подземным (колодцам, скважинам, родникам). Подземные воды нередко воспринимаются как более чистые и даже целебные, хотя эти качества не всегда подтверждены лабораторно. Стихийное использование нецентрализованных источников несет риски для здоровья из-за отсутствия должного контроля качества и соответствия санитарным нормам.

В поселке городского типа (пгт) Ярославский Приморского края распространено использование альтернативных источников водоснабжения местными жителями. Наибольшей популярностью пользуются два родника, общественный колодец и самоизливающаяся скважина на ул. Комсомольской. Однако колодец и скважина расположены в зоне потенциального влияния хвостохранилища Ярославского горно-обогатительного комбината (ГОКа) – объекта накопленного экологического вреда. Деятельность данного ГОКа (единственного в России производителя флюоритового концентратата) остановлена в 2013 г., но хвостохранилище продолжает представлять опасность. Известно, что хвостохранилища – источник повышенной экологической опасности, обусловленной риском загрязнения подземных вод в результате фильтрации загрязненных вод в подземные горизонты [3–11]. Даже при соблюдении проектных решений при строительстве и эксплуатации хвостохранилищ практически невозможно полностью исключить их негативное воздействие на окружающую среду. Таким образом, существует вероятность загрязнения подземных вод, питающих альтернативные источники, компонентами, вымываемыми из накопленных отходов.

Цель настоящего исследования – оценить влияние хвостохранилища Ярославского ГОКа на качество воды в нецентрализованных источниках водоснабжения пгт Ярославский (родники, колодцы, самоизливающаяся скважина). Исследование направлено на выявление фактов и масштабов техногенного загрязнения подземных вод для обеспечения безопасности питьевой воды, используемой населением.

Объект исследования

Объект исследования – хвостохранилище Ярославского горно-обогатительного комбината и прилегающие подземные водоносные горизонты. Ярославский ГОК проводил добычу и обогащение флюоритовых руд (производство плавикового шпата) из крупнейших в России Вознесенского и Пограничного месторождений, расположенных в Хорольском районе Приморского края (рис. 1). Уникальность руд этих месторождений заключается в присутствии помимо флюорита стратегически важных элементов – бериллия, лития, рубидия и цезия. Щелочные металлы (Li, Rb, Cs) и бериллий входят в состав минералов, сопутствующих флюориту (например, слюд и берtrandита), и в процессе флотационного обогащения переходят в хвосты обогащения. В результате в хвостохранилище концентрируются не только основной минерал – флюорит (CaF_2), но и ряд потенциально токсичных элементов [12–14].

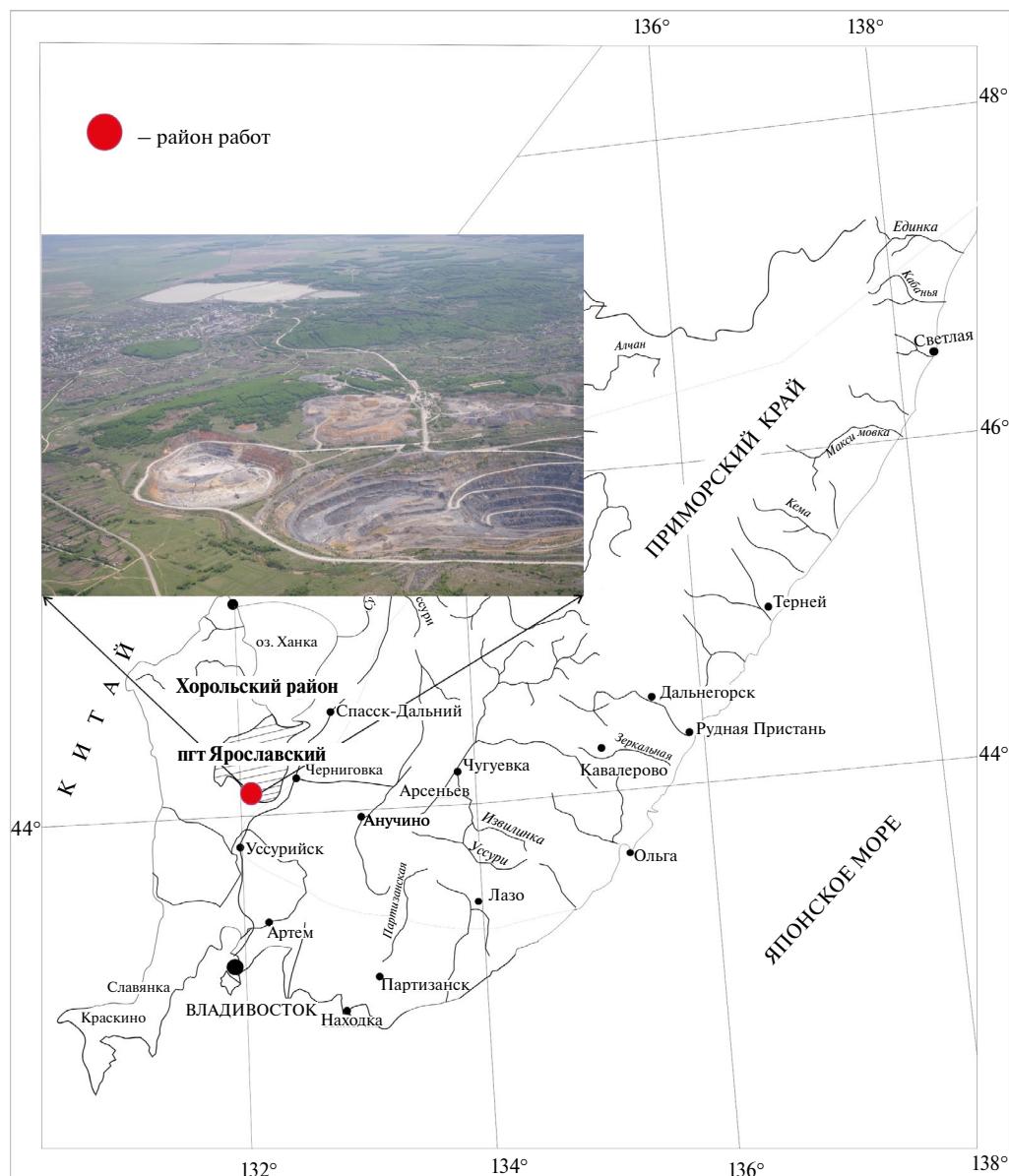


Рис. 1. Район работ на схеме Приморского края

По нашим данным, в отходах обогащения, размещенных в данном хвостохранилище, содержатся элементы, которые в своих медианных значениях значительно превышают их кларковые содержания в литосфере. Так, содержание бериллия в хвостах в 113 раз выше кларка, мышьяка – в 104, кадмия – в 92, лития – в 72, цинка – в 47, олова – в 28, молибдена и цезия – в 25, рубидия – в 22, свинца – в 16, вольфрама и таллия – в 13, меди и тантала – в 3, стронция – в 2 раза (рис. 2). Многие из этих элементов относятся к 1-му и 2-му классам опасности по воздействию на здоровье человека в силу проявления канцерогенных и мутагенных свойств [15–18].

Все эти элементы и их соединения обладают хорошей растворимостью и высоким коэффициентом водной миграции, что часто приводит к вторичному накоплению в различных средах и объектах биосфера [3, 19–22] и, как следствие, к загрязнению водных ресурсов, почв. Это может вызывать долгосрочные экологические проблемы и представлять угрозу для здоровья человека.

Рассматриваемое хвостохранилище представляет собой каскад из трех прудов, образованных дамбами разной высоты. Пруды расположены на абсолютных отметках 120–140 м, что на 20–30 м выше уровня поселка. Общий объем накопленных хвостов составляет десятки тысяч тонн. Хвостохранилище поддерживается в заполненном водой состоянии для минимизации пыления отходов.

Объект находится в зоне потенциального подтопления, длительное время подвергается воздействию разрушительных факторов: гидростатического давления столба жидкого отходов и фильтрационного напора, действующих на тело дамб [23]. С прекращением деятельности обогатительной фабрики интенсивность гидродинамического воздействия несколько снизилась, однако обводненные отходы флотации продолжают создавать значительную нагрузку на элементы конструкции. Кроме того, действуют процессы химической суффозии – растворения и выноса растворимых компонентов из массива хвостов, приводящие к образованию пустот и снижению прочности грунтов основания дамбы. Совокупность этих факторов способна нарушить целостность противофильтрационных экранов и усилить инфильтрацию загрязненных вод в подземные горизонты.

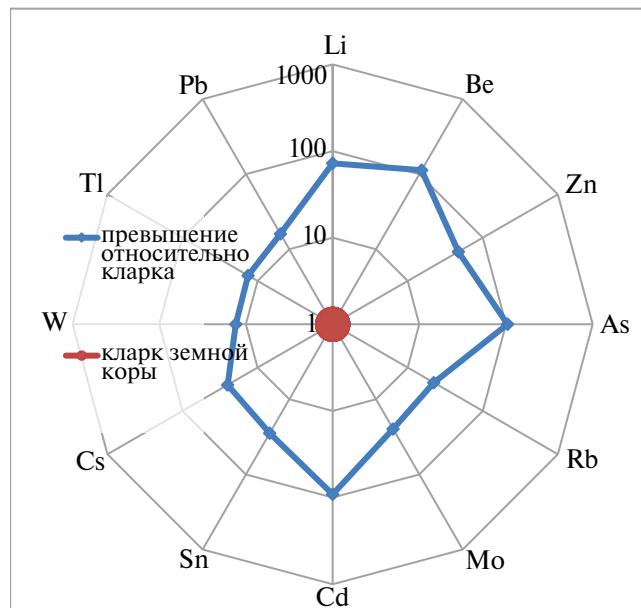


Рис. 2. Радиальная диаграмма медианных значений химических элементов в отложениях хвостохранилища Ярославского (кларк по [15])

Методы исследования и индикаторы оценки загрязненности водных объектов

В рамках полевых работ проведен отбор проб техногенных и природных вод для гидрохимического анализа. Всего отобрано 5 проб воды из разных участков хвостохранилища (поверхностные воды хвостовых прудов и одна пробы из шурфа в толще хвостов) и 4 пробы подземных вод из местных источников (общественный колодец, самоизливающаяся скважина и два родника) (рис. 3).

Отбор проб осуществлялся дискретно из приповерхностного слоя воды с соблюдением требований к отбору проб для химического анализа. Каждая пробы отбиралась в емкость из полипропилена. Фильтрация проб осуществлялась через мембранный фильтр (0,45 мкм) с помощью вакуумного насоса.

В пробах измерены показатели: pH, минерализация (сухой остаток), основные ионы (HCO_3^- , SO_4^{2-} , Cl^- , Ca^{2+} , Mg^{2+} , Na^+ , K^+ , F^-), а также концентрации ряда микроэлементов и тяжелых металлов (в том числе Be, Li, As, Cd, Zn, Pb, Mn, Fe и др.). Анализы выполнены в лаборатории аналитической химии Аналитического центра ДВГИ ДВО РАН методом атомно-эмиссионной спектрометрии (ИСП-АЭС, спектрометр iCAP 7600 Duo) для катионов и масс-спектрометрии с индуктивно связанный плазмой (ИСП-МС, спектрометр Agilent 7700) для определения микроэлементного состава. Точность анализа контролировалась с помощью стандартных образцов. Определение гидрокарбонатов выполнено с помощью титратора Dosimat 765 от Metrohm (Швейцария), цена деления 0,002 мл. Общая минерализация воды (Σn) определялась как сумма макрокомпонентов:

$$\Sigma n = [\text{Na}^+] + [\text{K}^+] + [\text{Ca}^{2+}] + [\text{Mg}^{2+}] + [\text{SO}_4^{2-}] + [\text{Cl}^-] + [\text{HCO}_3^-].$$

Оценка степени техногенного загрязнения подземных вод проводилась путем сравнения химического состава проб с гигиеническими нормативами для питьевой воды. В качестве критерии безопасности использованы предельно допустимые концентрации (ПДК) химических веществ в воде хозяйствственно-питьевого назначения согласно действующим санитарным правилам (СанПиН 1.2.3685-21).

Кроме химических критериев учитывались геохимические индикаторы, позволяющие судить о техногенности вод. Такими индикаторами являются аномально высокие концентрации элементов, характерных для отходов данного производства (например, Li, Be, F⁻ для флюоритовых хвостов), а также нетипичные соотношения ионов. Анализ ионного состава проводился с использованием диаграмм Пайпера, что позволило сравнить типы вод из хвостохранилища и природных источников.

Гидрогохимические механизмы миграции загрязнителей

Миграция загрязняющих веществ из хвостохранилища в подземные воды определяется совокупностью физико-химических процессов. В основании рассматриваемого хвостохранилища присутствует противофильтрационный слой, однако со временем его эффективность может снижаться. Под давлением столба воды в прудах происходит фильтрация поровой воды хвостов вниз и в стороны от хранилища. Адверсивное (напорное) течение переносит растворенные вещества в окружающий грунт. При этом скорость потока и объем утечек возрастают при повышении уровня хвостохранилища во время осадков и паводков.

Важным процессом является диффузия – молекулярное проникновение растворенных компонентов из более концентрированной среды (техногенные воды) в менее минерализованные грунтовые воды. Диффузионный перенос особенно значим при низких скоростях фильтрации, так как позволяет загрязнителям распространяться даже при незначительных утечках.

Химическая суффозия – процесс растворения и вымывания легкоподвижных соединений из массива хвостов – приводит к образованию выщелоченных зон и каналов внутри хвостохранилища. Эти каналы увеличивают проницаемость и создают пути для ускоренной инфильтрации загрязнений. В случае хвостохранилища Ярославского ГОКа основными

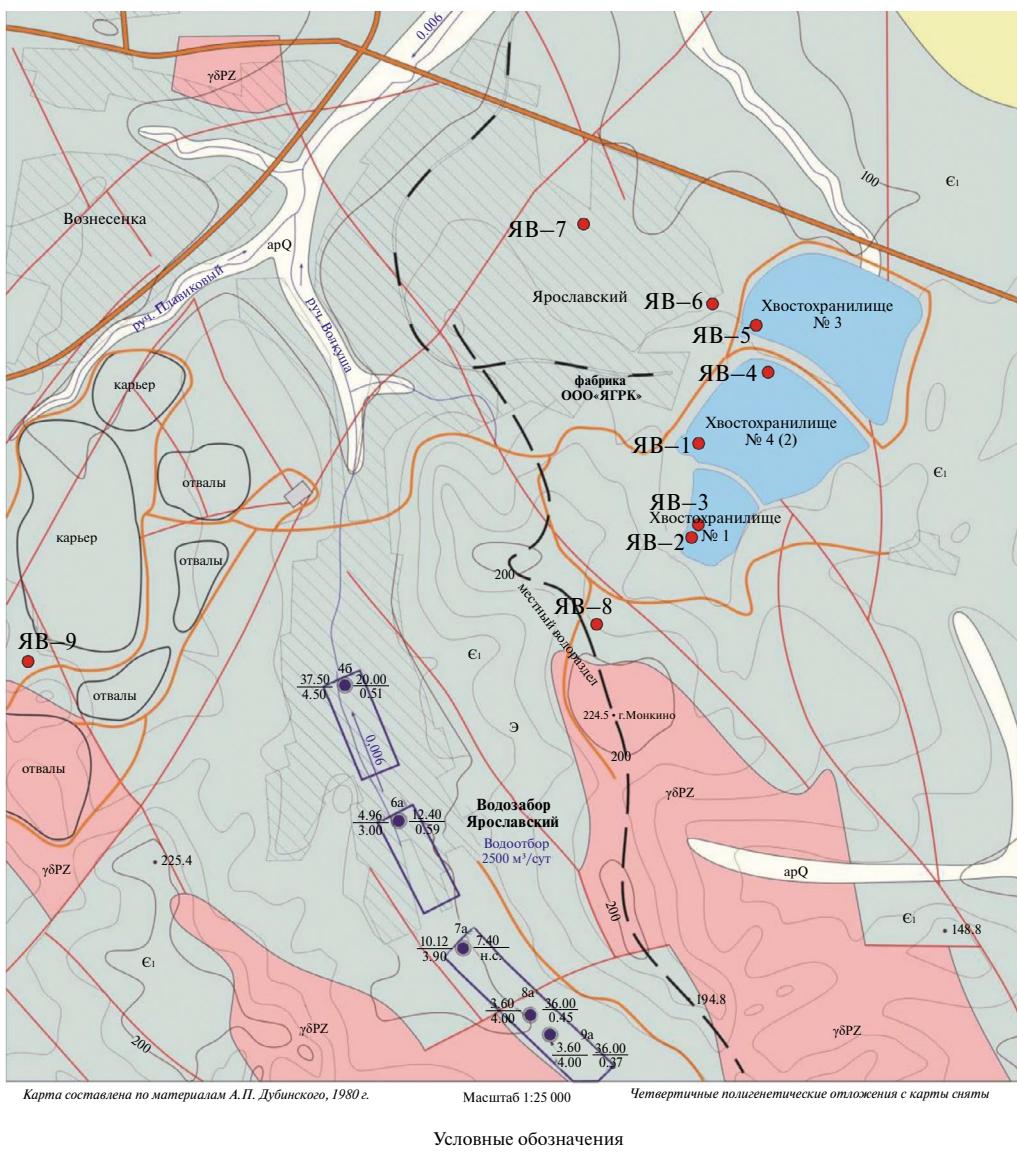


Рис. 3. Гидрогеологическая карта района исследований (по: А.П. Дубинский, 1980 г.) с точками отбора проб. Условные обозначения: 1 – точка отбора пробы воды и ее номер; 2 – водоносный горизонт аллювиально-пролювиальных четвертичных отложений (песок, гравий, дресва, щебень с прослойями глин); 3 – водоносный комплекс усть-суйфунской свиты миоцена (пески, гравийники, галечники, песчаники, алевролиты с прослойями глин); 4 – водоносная зона терригенно-карбонатных и метаморфических образований нижнего кембрия (известняки, сланцы, алевролиты, песчаники); 5 – водоносная зона палеозойских интрузивных образований (граниты, гранодиориты, порфириты); 6 – эксплуатационная скважина водозабора. Цифры у знака скважины: вверху – номер; дробь слева: в числите – дебит (л/с), в знаменателе – понижение (м); дробь справа: в числите – уровень (м), в знаменателе – минерализация (г/дм³); 7 – направление, уклон потока подземных вод и его величина (м); 8 – контур второго пояса зоны санитарной охраны; 9 – разломы различного генезиса и морфологии; 10 – граница водоносных горизонтов и зон

растворимыми компонентами являются гипс и флюорит. Гипс ($\text{CaSO}_4 \cdot 2\text{H}_2\text{O}$) относительно легко переходит в раствор, повышая сульфатную жесткость воды. Флюорит (CaF_2) менее растворим, но при кислотности, создаваемой окислением сульфидных минералов, возможно высвобождение иона F^- . Таким образом, внутри хвостохранилища за годы хранения происходят гипергенные процессы – окисление сульфидов, выщелачивание солей, гидролиз силикатов. Эти процессы изменяют химию поровых вод: повышается минерализация, накапливаются сульфаты, фториды, металлы. Водообмен с атмосферой (осадки, испарение) также влияет на концентрацию загрязнителей: испарение концентрирует соли, а инфильтрация дождевой воды может, с одной стороны, разбавлять растворы, с другой – вымывать новые порции загрязнений.

При миграции в породах часть загрязнителей может задерживаться за счет адсорбции и ионообмена на поверхности минералов грунта. Так, глинистые и органические частицы способны поглощать катионы тяжелых металлов, уменьшая их подвижность. Катионный обмен между твердой (грунт) и жидкой (вода) фазами существенно влияет на состав подземных вод и может ограничивать миграцию ряда металлов. Однако эффективность сорбции зависит от pH среды: при кислых значениях (ниже ~5) адсорбция многих металлов снижается, и они легче мигрируют в растворенной форме. Если же воды нейтральные или щелочные, гидроокиси металлов могут выпадать в осадок, осаждая, например, Fe^{3+} , Al^{3+} , а сопутствующие элементы соосаждаются [24].

Редокс-условия также влияют на формы и подвижность загрязнителей. В присутствии кислорода (окислительная обстановка) происходят реакции окисления сульфидов (FeS_2 , ZnS и др.), что приводит к образованию серной кислоты и повышенному содержанию сульфатов и металлов в подземных водах. В анаэробных восстановительных условиях, наоборот, подвижность некоторых элементов (например, урана, сурьмы, мышьяка в форме As(V)) может снижаться из-за восстановления до малорастворимых форм.

Таким образом, сочетание гидродинамических (напор фильтрации, диффузия) и геохимических (растворение, окисление, адсорбция) механизмов определяет миграцию примесей из хвостохранилищ. В случае Ярославского хвостохранилища ожидаемыми индикаторами техногенного влияния в подземных водах являются повышенные концентрации элементов, содержащихся в флюоритовых рудах, прежде всего фтора, лития, бериллия, а также тяжелых металлов, сопутствующих вмещающим породам.

Гидрогеологическая характеристика района работ

По гидрогеологическому районированию Приморского края участок работ локализуется в Маньчжурском гидрогеологическом массиве 1-го порядка Пограничного гидрогеологического массива 2-го порядка. В пределах района по литолого-стратиграфическому признаку и условиям залегания выделяются следующие водоносные горизонты, приуроченные к поровым и трещинным коллекторам (см. рис. 3).

Водоносный горизонт аллювиально-пролювиальных четвертичных отложений (арQ). Отложения слагают дно временных водотоков (овраги, балки, пади) и в долинах рек Илистая, Абрамовка, Березянка, Волкуша и их притоков. Залегает первым от поверхности. Питание горизонта осуществляется поверхностными водами во время паводков за счет атмосферных осадков, а также подтоком подземных вод из пород, слагающих борта речных долин. Отложения представлены дресвой, гравием, песком, щебнем с прослойями глин. Мощность обводненных отложений не превышает 0,5–5 м.

Водоносный комплекс отложений усть-суйфунской свиты миоцена (N₁us) имеет распространение в северной части района. Комплекс представлен рыхлыми или слаболитифицированными породами: песками, гравийниками, галечниками, нередко с глинистым заполнителем, линзами и прослойями глин, а также песчаниками, алевролитами. В пределах района мощность отложений изменяется от 6 до 40 м. Комплекс залегает первым от поверхности и подстилается отложениями усть-давыдовской свиты миоцена. Водообильность отложений в пределах района довольно высокая.

Водоносная зона терригенно-карбонатных и метаморфических образований нижнего кембрия (Е₁) имеет широкое распространение в районе работ. Образования представлены

известняками, кварцево-серицитовыми и серицитовыми сланцами, алевролитами, песчаниками. Трещиноватость наблюдается на всю вскрытую мощность до 100 м.

Трещинные и трещинно-пластовые воды приурочены к метаморфическим и кристаллическим сланцам. Воды вскрыты скважинами на глубине 2,47–13,82 м. Воды безнапорные или обладают небольшим напором. Режим вод относительно стабилен. Дебит скважин составляет 0,32–6,0 л/с при понижении 2,5–11,9 м, удельный дебит – 0,13–0,77 л/с, коэффициент фильтрации – 0,3–2,8 м/сут. Обводненные сланцы имеют большую площадь распространения и, контактируя с известняками, неизменно их подпитывают.

Водоносная зона палеозойских интрузивных образований (удРZ) в районе имеет ограниченное распространение. Образования представлены гранитами, гранодиоритами, порфиритами.

Согласно гидрогеологической карте, все изученные природные источники подземных вод приурочены к водоносной зоне терригенно-карбонатных и метаморфических образований кембрия.

Результаты и обсуждение

Химический состав техногенных и природных вод

Анализ проб показал существенное различие между водами хвостохранилища (техногенные воды) и природными подземными водами, используемыми для питья. Минерализация вод хвостохранилища варьирует от 567,8 до 1593,6 мг/дм³, т. е. от пресных до слабосолоноватых по классификации минерализации. Реакция среды слабощелочная (рН = 7,3–8,1). Для сравнения, подземные воды из родников и колодцев имеют минерализацию 110–675,9 мг/дм³, т. е. от ультрапресных до пресных, при рН ~ 7,0 (табл. 1). Повышенная минерализация некоторых проб подземных вод (до 676 мг/дм³) может указывать на смешение с техногенными водами или естественное минеральное питание из пород.

Таблица 1
Основной химический состав вод хвостохранилища и подземных источников (мг/л)

Номер пробы	Тип вод	pH	M	HCO ₃	SO ₄ ²⁻	Cl ⁻	NO ₃ ⁻	F ⁻	Ca ²⁺	Mg ²⁺	Na ⁺	K ⁺	Li ⁺
ЯВ-1 (хвост.)	Тех- но- генные	8,0	723,9	360,0	124	21,9	0,77	11,1	11,5	7,32	173	13,9	0,41
ЯВ-2 (шурф)		7,5	1593,6	487,2	620	23,4	<0,1	8,36	85,7	23,1	317	28,1	0,77
ЯВ-3 (хвост.)		7,9	763,6	373,4	129	30,2	0,21	10,1	19,4	7,16	171	22,8	0,35
ЯВ-4 (хвост.)		7,9	567,8	269,9	111	16,5	0,40	7,34	7,14	6,03	140	9,18	0,29
ЯВ-5 (хвост.)		7,9	1245	393,9	432	36,7	<0,1	13,8	17,4	13,7	313	23,7	0,76
ЯВ-6 (скважина)	При- род- ные	6,6	175,4	119,0	12,2	3,28	0,28	<0,3	19,6	8,79	11,5	0,74	<0,01
ЯВ-7 (колодец)		6,9	261,5	163,2	31,5	5,15	0,16	<0,3	40,4	8,55	12,0	0,53	<0,01
ЯВ-8 (родник)		6,9	110	70,8	9,05	2,54	0,21	0,79	16,9	4,67	4,92	0,11	<0,01
ЯВ-9 (родник)		6,9	675,9	179,8	225	70,6	5,08	0,94	134	20,3	39,4	0,79	<0,01

Примечание: хвост. – пробы воды хвостохранилища; шурф – пробы поровой воды из шурфа в теле хвостов; родник, колодец, скважина – природные источники поселка.

По катионно-анионному составу техногенные воды представлены преимущественно гидрокарбонатными натриевыми, гидрокарбонатно-сульфатными натриевыми и хлоридно-гидрокарбонатно-сульфатными натриевыми типами (рис. 4). В хвостовых водах отмечается аномально высокая доля фторида – до **6% от суммы анионов**, тогда как в природных водах содержание F^- не превышает 1–1,5 мг/л (~10% ПДК). Также в составе техногенных вод обнаружены значимые концентрации лития: около **1% от суммы катионов**, что эквивалентно десяткам миллиграммов на литр Li^+ . Для подземных вод вне зоны влияния такие количества лития нехарактерны (фоновые значения $Li^+ < 0,1$ мг/л). Наличие столь заметных долей фтора и лития подтверждает вклад выщелачивания флюоритовых руд и слюдистых минералов хвостов в химию вод хвостохранилища.

Из табл. 1 видно, что техногенные воды характеризуются повышенным содержанием сульфатов (до 620 мг/л) и натрия (до 317 мг/л), тогда как в природных водах преобладают гидрокарбонаты кальция. Проба воды из шурфа имеет наиболее высокую концентрацию сульфата, что свидетельствует о более тесном контакте с твердыми отходами и процессах окисления сульфидов внутри хвостов (отмечено максимальное содержание серы в растворе).

Подземные воды родников, колодца и скважины в целом соответствуют гидрокарбонатному кальциево-магниевому типу, характерному для грунтовых вод, сформировавшихся на карбонатных породах (см. рис. 4). Минерализация в них ниже, чем в хвостах, однако в роднике (ЯВ-9) отмечены сравнительно высокая минерализация (676 мг/л) и повышенные хлориды (70,6 мг/л) и сульфаты (225 мг/л) по сравнению с водами родника (ЯВ-8), колодца (ЯВ-7) и скважины (ЯВ-6). Это может отражать естественную вариацию – влияние состава пород вышележащего отвала.

Распространение микроэлементов и токсичных компонентов

Особое внимание уделялось содержанию в водах токсичных элементов 1–2-го классов опасности, таких как бериллий (Be), мышьяк (As), кадмий (Cd), а также литий (Li) и другие металлоиды. В воде хвостохранилища ожидаются макси-

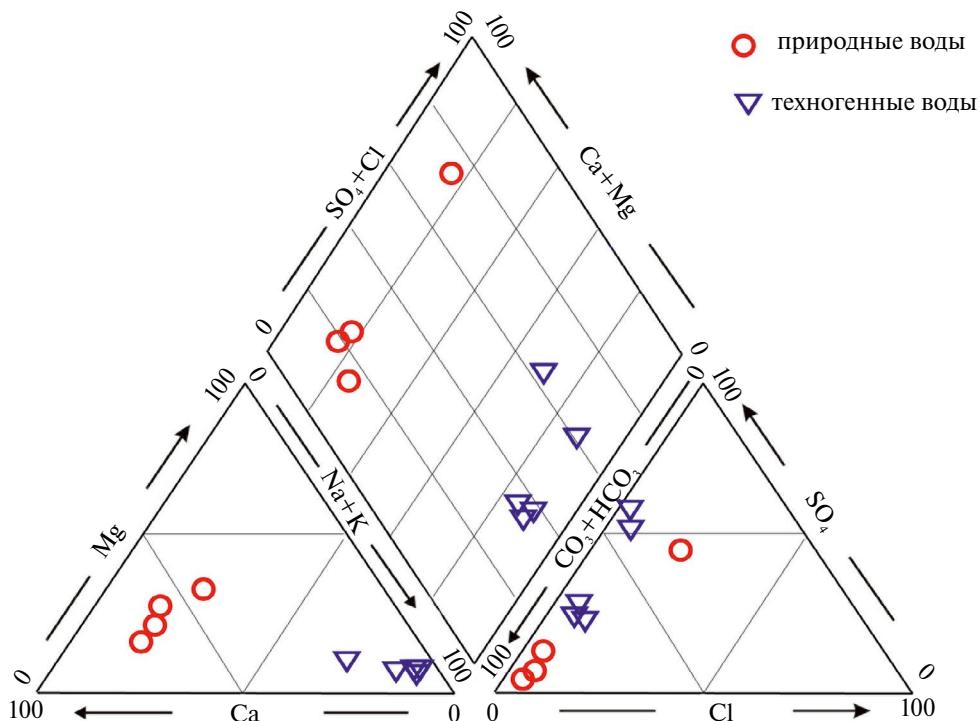


Рис. 4. Соотношение основных катионов и анионов в техногенных и природных водах пгт Ярославский

мальные концентрации мышьяка (1437 мкг/л), серы (111 981 мкг/л), лития (872,4 мкг/л), марганца (466,6 мкг/л), цинка (516,6 мкг/л), рубидия (196,6 мкг/л), стронция (620,2 мкг/л), урана (10,87 мкг/л), цезия (8,538 мкг/л), бериллия (3,89 мкг/л), никеля (2,68 мкг/л), кадмия (2,25 мкг/л), высокие значения бария и молибдена (табл. 2, рис. 5). Эти величины существенно (в разы) превышают фоновые концентрации данных элементов в грунтовых водах.

Таблица 2

Состав микроэлементов в исследованных пробах техногенных вод хвостохранилищ и природных подземных вод на территории пгт Ярославский в 2022 г. (мкг/л)

Элемент	ЯВ-1	ЯВ-2	ЯВ-3	ЯВ-4	ЯВ-5	ЯВ-6	ЯВ-7	ЯВ-8	ЯВ-9
	Техногенные					Природные подземные			
Li	488,5	872,4	419,5	371,3	856,8	12,97	9,60	0,33	2,65
Be	0,27	3,89	1,70	0,099	0,034	0,004	0,004	0,032	0,009
B	149,7	354,7	153,9	134,1	395,1	≤19	≤19	≤19	24,32
Al	47,95	58,21	50,33	425,6	94,69	1,78	3,50	8,11	9,56
P	32,52	25,56	24,46	17,79	15,88	19,77	3,77	3,30	9,83
S	23810	111981	22878	21124	75853	2100	5296	1504	37808
Sc	0,025	0,078	0,041	0,011	0,020	0,055	0,055	0,039	0,046
Ti	0,503	0,570	0,487	0,521	0,520	0,127	0,149	0,225	0,188
V	0,515	0,866	0,309	0,542	2,19	0,041	0,006	0,091	0,095
Cr	0,106	0,140	0,106	0,122	0,103	0,011	0,014	0,037	0,091
Mn	12,37	466,6	3,06	5,74	0,475	2,03	129,21	0,308	1,54
Fe	61,04	10,68	34,53	16,19	2,81	4,78	15,64	3,13	3,33
Co	0,154	0,524	0,104	0,082	0,060	0,057	0,458	0,051	0,410
Ni	1,99	2,68	0,931	1,62	0,677	0,394	0,503	0,781	1,989
Cu	4,263	4,080	2,528	14,49	4,628	0,201	0,147	0,928	0,952
Zn	16,24	516,6	3,98	2,46	18,04	1,99	359,	5,448	6,046
Ga	0,044	0,026	0,026	0,075	0,044	≤0,0018	0,004	≤0,0018	0,003
Ge	0,031	0,041	0,027	0,019	0,050	0,026	0,028	0,007	0,005
As	661,8	39,64	338,1	432,7	1437	0,458	2,97	0,231	1,527
Se	0,198	0,653	0,186	0,197	0,498	0,036	≤0,017	0,045	0,149
Rb	72,80	196,6	64,77	60,93	185,1	1,81	1,22	0,086	1,16
Sr	158,1	620,2	186,1	115,1	271,7	131,9	277,3	81,08	451,3
Zr	0,162	0,293	0,153	0,134	0,171	0,019	0,050	0,048	0,055
Nb	0,004	0,004	0,003	0,003	0,008	0,000	0,001	0,002	0,001
Mo	62,62	108,6	53,29	37,39	261,4	0,116	0,349	0,073	0,268
Ag	1,063	0,071	0,097	0,158	0,683	0,016	0,007	0,002	0,005
Cd	0,109	2,25	0,050	0,041	0,218	0,012	0,005	0,011	0,064
Sn	0,168	0,062	0,051	0,092	0,048	0,008	0,014	0,009	0,017
Sb	0,876	2,00	0,615	0,975	5,156	0,110	0,160	0,445	0,409
Te	0,033	0,013	0,016	0,032	0,018	≤0,0041	≤0,0041	≤0,0041	≤0,0041

Таблица 2. Окончание

Эле- мент	ЯВ-1	ЯВ-2	ЯВ-3	ЯВ-4	ЯВ-5	ЯВ-6	ЯВ-7	ЯВ-8	ЯВ-9
	Техногенные					Природные подземные			
Cs	0,550	8,538	0,495	0,356	2,229	0,238	0,074	0,001	0,484
Ba	23,11	28,01	44,16	19,99	18,79	6,52	37,57	19,75	26,91
Hf	0,005	0,010	0,004	0,004	0,005	0,001	0,002	0,001	0,002
Ta	0,001	0,001	0,001	0,000	0,000	0,000	0,000	0,000	0,000
W	30,77	0,799	4,61	20,73	93,2	0,031	0,014	0,007	0,015
Tl	0,025	1,017	0,017	0,006	0,115	0,001	0,009	0,006	0,027
Pb	0,682	0,559	0,137	0,151	0,174	0,018	0,045	0,610	0,507
Bi	0,022	0,006	0,013	0,010	0,006	0,000	0,001	0,000	0,001
Th	0,017	0,014	0,012	0,005	0,001	0,000	0,000	0,001	0,001
U	1,32	10,87	1,070	1,16	5,39	0,012	0,347	0,010	1,25

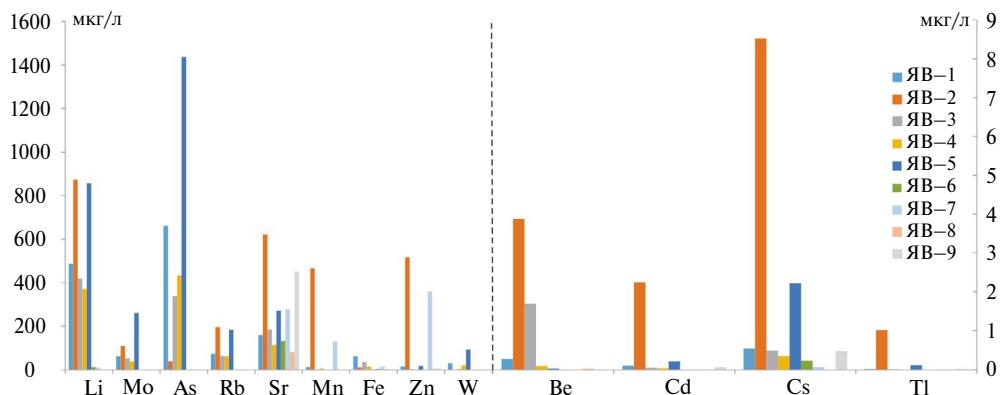


Рис. 5. Распределение микрэлементов в природных и техногенных водах пгт Ярославский, мкг/л: ЯВ-1–ЯВ-5 – техногенные воды хвостохранилища Ярославского ГОКа; ЯВ-6–ЯВ-9 – природные подземные воды

Следует отметить, что многие из обнаруженных в хвостах элементов относятся к опасным для здоровья: As и Cd – канцерогены 1-го класса, Be – высокотоксичен, Li при значительных дозах воздействует на нервную систему и почки. В связи с этим потенциальное попадание этих компонентов в источники питьевой воды вызывает обеспокоенность.

При сравнении полученных концентраций микроэлементов в водах нецентрализованных источников водоснабжения, используемых жителями для питьевых целей, с нормативными значениями для питьевого и хозяйственного назначения¹ выявлено небольшое превышение содержания марганца в одном источнике питьевой воды (ЯВ-7). На рис. 6 схематично показано сравнение концентраций некоторых ключевых элементов (Mn, As, Li, Be, Cd, Pb) в пробах природных подземных вод с нормативными уровнями (100% соответствует ПДК). Видно, что по большинству компонентов доля от ПДК составляет менее 50% и лишь Mn в колодце (ЯВ-7) превышает 100%. В воде общественного колодца по ул. Заречной содержание марганца достигло 129 мкг/л, что в 1,3 раза выше ПДК (100 мкг/л). Марганец относится ко 2-му классу опасности: его избыточное потребление может приводить к неврологическим

¹ СанПиН 1.2.3685-21. Гигиенические нормативы и требования к обеспечению безопасности (или безвредности) для человека факторов среды обитания. Введены 28.01.2021.

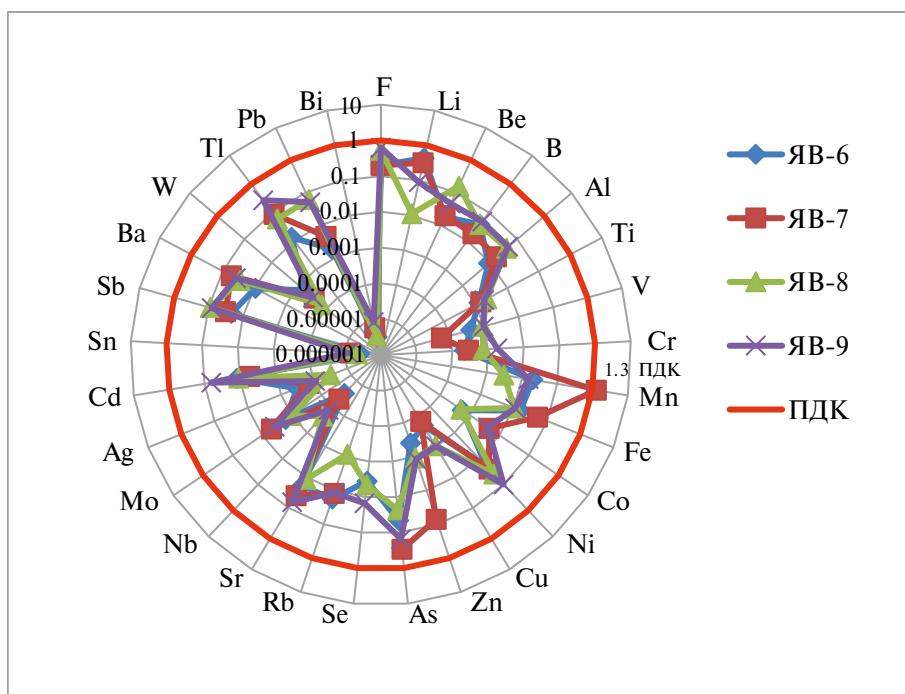


Рис. 6. Радиальная диаграмма концентраций микроэлементов в подземных водах пгт Ярославский

расстройствам при долгосрочном накоплении. Помимо марганца в той же пробе колодезной воды отмечены повышенные относительно других источников концентрации железа, цинка, мышьяка, бария, лития и кобальта. Однако содержания этих элементов не превышают ПДК, т. е. формально находятся в пределах нормы. Так, концентрация As в колодце ~3 мкг/л (при ПДК 10 мкг/л), Cd <1 мкг/л (ПДК 3 мкг/л), Li ~ 30 мкг/л (ПДК для питьевой воды – 30 мкг/л). В родниках концентрации тяжелых металлов и токсичных элементов еще ниже, зачастую на уровне пределов обнаружения. Таким образом, эта наглядная оценка подтверждает относительную благополучность ситуации по состоянию на период обследования, качество воды в обследованных источниках в настоящее время отвечает гигиеническим требованиям по изученным элементам. Колодец демонстрирует несколько более высокое содержание ряда элементов, что, возможно, связано как с техногенным влиянием (близость хвостохранилища), так и с природной геохимической аномалией в районе.

Присутствие в воде колодца даже невысоких концентраций таких элементов, как As, Be, Li, тем не менее вызывает необходимость токсикологического анализа их потенциального воздействия. Многие из этих элементов кумулятивны, т.е. способны накапливаться в организме при продолжительном употреблении воды. Например, литий при концентрациях более 0,1 мг/л может со временем накапливаться в щитовидной железе [25], мышьяк даже в низких дозах имеет канцерогенное действие при многолетнем приеме. В связи с этим требуется проведение оценки риска для здоровья.

Отсутствие значительного техногенного загрязнения подземных вод на данный момент может объясняться несколькими факторами: во-первых, естественная фильтрация и сорбция в толщах грунтов могла задержать большую часть тяжелых элементов на пути к источникам; во-вторых, нельзя исключать и то, что гидрогеологические условия (например, направление подземного стока) таковы, что инфильтрационные потоки из хвостохранилища пока не достигли конкретных родников. Однако вероятно, что техногенный след уже проявляется: косвенным указанием служит упомянутое превышение Mn и общее повышение минерального фона колодезной воды. Для окончательного вывода необходимы расширенные исследования, включая трассировку вод, изотопный анализ, длительный мониторинг концентраций.

Оценка токсикологического риска

Рассмотрим токсикологические свойства основных выявленных загрязнителей и потенциальный риск для населения при их поступлении с питьевой водой. Ключевыми элементами, вызывающими озабоченность, являются мышьяк (As), кадмий (Cd), бериллий (Be), свинец (Pb), ртуть (Hg) (последние два обнаружены в следовых количествах) – все они отнесены к 1-му классу опасности (чрезвычайно опасные вещества) по воздействию на организм. По классификации Международного агентства по изучению рака [16] мышьяк и его соединения отнесены к группе 1 (канцероген для человека), кадмий и бериллий – также канцерогены для человека. Канцерогенное и мутагенное действие этих металлов подробно рассмотрено, например, в труде В.В. Худолея [17] и монографиях IARC [16]. Бериллий опасен в первую очередь при ингаляции (вызывает бериллиоз легких), однако и при поступлении с водой он способен приводить к поражению кишечника и развитию злокачественных опухолей у экспериментальных животных [26]. Санитарные нормы РФ регламентируют присутствие бериллия в воде питьевой систем централизованного, в том числе горячего, и нецентрализованного водоснабжения, воде подземных и поверхностных водных объектов хозяйственно-питьевого и культурно-бытового водопользования, воде плавательных бассейнов, аквапарков, в питьевой воде не выше 0,0002 мг/л.

Мышьяк (As) даже при концентрациях порядка десятков микрограммов на литр повышает риск рака кожи, внутренних органов и оказывает системное токсическое действие (хронический арсеникоз). Установленная Всемирной организацией здравоохранения (ВОЗ) и российскими СанПиН норма 0,01 мг/л основана на минимизации канцерогенного риска. В рассматриваемых водах As не превышает 0,003 мг/л, т. е. вклад в канцерогенный риск незначителен, однако близость источника мышьяка (хвостохранилища) требует постоянного контроля, поскольку даже временное превышение норм может иметь отдаленные последствия.

Кадмий (Cd) – сильный почечный и печеночный токсикант, накопление которого приводит к остеомаляции и почечной недостаточности. ПДК Cd в воде очень низка (0,003 мг/л) именно из-за высокой опасности. В пробах подземных вод Cd <0,001 мг/л, т. е. непосредственной угрозы нет. Однако в хвостовых водах концентрация Cd на два порядка выше (до 0,05–0,1 мг/л, согласно данным лаборатории), что создает риск при возможном попадании этих вод в колодцы.

Литий (Li) не относится к типичным канцерогенам или токсикантам 1-го класса, однако его соединения оказывают влияние на нервную систему и функцию почек. Литий применяется как психотропный препарат, и длительное употребление воды с повышенным Li может приводить к изменению психоэмоционального состояния. Недавние исследования также связывают избыток лития в воде с риском нарушений функции щитовидной железы. ВОЗ не установила норматив по Li, но некоторые страны рекомендуют ориентироваться на концентрацию не выше 0,07 мг/л. В колодце Li около 0,03 мг/л, что можно считать безопасным уровнем, однако в воде хвостохранилища – более 0,5 мг/л. Таким образом, литий следует учитывать в мониторинге.

Фтор (F⁻) присутствует в хвостохранилище в существенных количествах. Фториды в питьевой воде в концентрации 1–1,5 мг/л полезны для профилактики кариеса, но при превышении ~2 мг/л приводят к флюорозу (поражение зубной эмали), а >5 мг/л – к поражению костей. В родниках рассматриваемой территории фтор не превышает 1 мг/л, однако близость крупного резервуара с фторсодержащими отходами требует контроля: потенциальная утечка концентрированных фторидных вод может быстро привести к недопустимым уровням F⁻ в колодцах.

Суммарно текущие риски для здоровья населения оцениваются как приемлемые, поскольку фактические концентрации токсикантов (As, Cd, Pb, Be и др.) ниже нормативных порогов. Индекс опасности (отношение концентрации к ПДК) для большинства веществ <1, и суммарный индекс загрязнения Zc для воды колодца остается низким (порядка 2–3 условных единиц по ключевым компонентам). Канцерогенный риск (вероятность развития рака за жизнь при данном содержании канцерогенов) также оценивается как находящийся ниже допустимого уровня $1 \cdot 10^{-5}$, поскольку концентрации As, Cd очень малы.

Тем не менее потенциальный риск существует в случае изменения ситуации: аварийного поступления крупных масс загрязненной воды или постепенного роста концентраций по мере истощения буферной емкости грунтов. Особенно следует учитывать опасность кумулятивного эффекта, – долговременное употребление даже слабо загрязненной воды может привести к накоплению вредных веществ в организме. Поэтому необходима разработка системы управления рисками и мероприятий по предотвращению ухудшения качества воды.

Рекомендации по мониторингу и управлению рисками

Результаты исследования диктуют необходимость принятия превентивных мер для защиты водных ресурсов пгт Ярославский. Во-первых, рекомендуется организовать систематический мониторинг подземных вод в зоне влияния хвостохранилища. Следует осуществлять регулярный (не реже 2 раз в год) отбор проб из всех используемых источников (родники, колодцы, скважины) и их химический анализ на широкий спектр элементов, включая тяжелые металлы и специфичные компоненты хвостов (F^- , Li, Be). Желательно также пробурить специальные наблюдательные скважины между хвостохранилищем и поселком для отслеживания качества грунтовых вод на пути возможной миграции загрязнений. Создание сети наблюдательных пунктов позволит заблаговременно обнаружить ухудшение качества воды до того, как загрязнение достигнет питьевых источников.

Во-вторых, необходимо уделять внимание техническому состоянию хвостохранилища. Рекомендуется систематическое проведение обследования дамб, дна и дренажной системы хвостохранилища с целью выявления признаков просачивания, разуплотнения или суффозии. При необходимости следует выполнять работы по укреплению дамб (подсыпка, бетонирование трещин, усиление противофильтрационного экрана).

Учитывая возрастающую частоту экстремальных метеорологических явлений (ливни, паводки) в Приморье, важно повысить устойчивость гидротехнического сооружения к возможному переливу и размыву. В последние годы на территории края отмечаются сильные наводнения, увеличившие нагрузку на подобные объекты. В случае разрушения дамбы может произойти катастрофический вынос накопленных за десятилетия загрязнений на рельеф и в реки. Поэтому превентивные меры должны включать создание системы аварийного водоотвода (каналы для отвода паводковых вод от хвостохранилища) и резервных емкостей для аварийного сброса вод хвостохранилища.

В-третьих, рекомендуется разработать и внедрить план управления рисками для населения поселка. Такой план должен предусматривать оповещение жителей в случае обнаружения превышения нормативов в воде или угрозы аварии на хвостохранилище. Желательно также провести разъяснительную работу с населением о потенциальных рисках стихийного использования родников без контроля качества.

Наконец, следует рассмотреть возможность утилизации хвостохранилища в долгосрочной перспективе. Современные технологии позволяют извлекать из старых хвостов ценные компоненты (в случае Ярославского ГОКа – тот же литий, бериллий и др.) и одновременно снижать токсичность остального массива отходов. Пока же необходимо поддерживать существующие защитные меры и не ослаблять мониторинговый контроль.

Заключение

Проведенное исследование позволило оценить современное состояние подземных вод пгт Ярославский под влиянием объекта накопленного вреда – хвостохранилища ГОКа. Химический состав техногенных вод хвостохранилища отличается повышенной минерализацией (до 1,6 г/л), преобладанием сульфат-натриевых солей и присутствием токсичных элементов (Li, Be, As, Cd и др.) в концентрациях, превышающих фоновые значения в десятки раз. Под действием гипергенных процессов в хвостах происходит переход опасных компонентов в водную фазу. Подземные воды – источники нецентрализованного водоснабжения – по составу принадлежат к гидрокарбонатному кальциевому классу, имеют минерализацию 0,1–0,68 г/л и в целом отвечают гигиеническим нормативам по содержа-

нию контролируемых элементов. Выявлено лишь небольшое превышение по марганцу (1,3 ПДК) в воде колодца; концентрации остальных потенциально опасных компонентов находятся ниже ПДК, несмотря на близость хвостохранилища. Таким образом, на момент исследования альтернативные источники водоснабжения населения пгт Ярославский можно считать безопасными по химическому составу.

В то же время установлено, что многие токсичные элементы (As, Be, Cd и др.) присутствуют в системе «хвостохранилище – подземные воды», пусть и в низких концентрациях, но их наличие подтверждает миграцию загрязнителей. Это создает потенциальную угрозу, которая может реализоваться при изменении гидрогеологических условий. Усиление инфильтрации, связанное, например, с экстремальными осадками или возможным повреждением дамбы, способно привести к резкому росту концентраций опасных веществ в родниках, колодцах и скважинах. В условиях участившихся паводков в Приморье такая ситуация весьма вероятна. Поэтому необходимо уделить самое серьезное внимание мониторингу и превентивным мерам. Рекомендовано организовать постоянный контроль качества воды, расширить перечень определяемых загрязнителей и оперативно внедрять защитные меры при первых признаках ухудшения обстановки. Также предложены технические решения по стабилизации хвостохранилища и снижению рисков аварийных выбросов.

Настоящее исследование демонстрирует важность комплексного научного подхода при оценке влияния объектов накопленного вреда на окружающую среду. Применение методов гидрохимического анализа в сочетании с токсикологической оценкой позволяет выявить скрытые угрозы и обосновать систему мероприятий, направленных на обеспечение экологической безопасности населения.

СПИСОК ИСТОЧНИКОВ

1. Юрченко С.Г., Шулькин В.М. Особенности химического состава питьевых вод г. Владивосток // Вестник ДВО РАН. 2010. № 5. С. 107–112.
2. Трунова И.Е., Зарецкая С.В. Гигиеническая оценка качества питьевой воды во Владивостоке // Тихоокеанский медицинский журнал. 2006. № 3. С. 64–66.
3. Тарасенко И.А., Зиньков А.В. Экологические последствия минералого-геохимических преобразований хвостов обогащения Sn–Ag–Pb–Zn руд (Приморье, Дальнегорский район). Владивосток: Дальнаука, 2001. 194 с.
4. Bortnikova S.B., Gas'kova O.L., Prisekina N.A. Geochemical estimation of the potential danger of waste rocks from the Veduginskoe deposit // Geochemistry International. 2010. Vol. 48, No. 3. P. 280–294.
5. Тарасенко И.А., Харитонова Н.А., Оводова Е.В., Зиньков А.В., Корзун А.В. Трансформация минералого-геохимического состава отходов обогащения и ее влияние на формирование высокоминерализованных вод (Приморский край, Россия) // Тихоокеанская геология. 2017. Т. 36, № 2. С. 106–118.
6. Крупская Л.Т., Орлов А.М., Голубев Д.А., Колобанов К.А., Филатова М.А. Оценка экологической опасности накопленных отходов переработки минерального сырья закрытых горных предприятий в Приамурье и Приморье // Горные науки и технологии. 2020. Т. 5, № 3. С. 208–223. <https://doi.org/10.17073/2500-0632-2020-3-208-223>
7. Бржанов Р.Т., Софронова Л.И. Хвостовые отложения – источник экологических проблем // Труды университета. 2021. № 1 (82). С. 72–77. https://doi.org/10.52209/1609-1825_2021_1_72
8. Злобин Н.И. Оценка загрязнения водных объектов заповедника «Денежкин Камень» от Шемурского месторождения // ХХI век. Техносферная безопасность. 2021. Т. 6, № 4. С. 395–407. <https://doi.org/10.21285/2500-1582-2021-4-395-407>
9. Курбонов М.Д., Растрогуев А.В. Обоснование прогнозов миграции для Дигмайского хвостохранилища // Вестник Филиала Московского государственного университета имени М.В. Ломоносова в городе Душанбе. 2022. Т. 1, № 1 (21). С. 129–137.
10. Семячков А.И., Почечун В.А., Семячков К.А. Гидрохимические условия техногенных подземных вод в объектах размещения отходов // Записки Горного института. 2023. Т. 260. С. 168–179. <https://doi.org/10.31897/PMI.2023.24>
11. Бударина В.А., Лисецкий Ф.Н., Косинова И.И., Курышев А.А. Особенности трансформации подземной гидросфера в пределах Стойленского горнорудного комплекса // Геология, география и глобальная энергия. 2024. № 3 (94). С. 13–22. https://doi.org/10.54398/20776322_2024_3_13

12. Комаров М.А., Алискеров В.А., Кусевич В.И., Заверткин В.Л. Горнопромышленные отходы – дополнительный источник минерального сырья // Минеральные ресурсы России. Экономика и управление. 2007. № 4. С. 3–9.
13. Гордиенко П.С., Ярусова С.Б., Крысенко Г.Ф. и др. Переработка флюоритсодержащего минерального сырья и отходов Ярославского горно-обогатительного комбината: монография. М.: РИОР, ИНФРА-М, 2018. 115 с. (Научная мысль). <https://doi.org/10.12737/1734-0>
14. Фатов А.С., Лихникович Е.Г. Гидрохимическая технология переработки хвостов обогащения Ярославского ГОКа – реального источника литиевой продукции // Труды Кольского научного центра РАН. 2018. Т. 9, № 2–1. С. 371–374.
15. Овчинников Л.Н. Прикладная геохимия. М.: Недра, 1990. 348 с.
16. IARC Monographs on the Evaluation of Carcinogenic Risks to Humans. Vol. 58: Beryllium, Cadmium, Mercury, and Exposures in the Glass Manufacturing Industry. Lyon: IARC, 1993. P. 41–117.
17. Худолей В.В. Канцерогены: характеристики, закономерности, механизмы действия. СПб.: Нестор, 1999. 420 с.
18. CICAD № 32. Beryllium and Beryllium Compounds. Geneva: WHO, 2001. 71 p.
19. Добровольский В.В. География микроэлементов. Глобальное рассеяние. М.: Мысль, 1983. 272 с.
20. Эйхлер В. Яды в нашей жизни. М.: Мир, 1993. 192 с.
21. Иванов В.В. Экологическая геохимия элементов: справочник: В 6 кн. / под ред. Э.К. Буренкова. М.: Недра, 1994. Кн. 1: s-элементы. 304 с.
22. Tarasenko I.A., Zin'kov A.V., Kholodov A.S., Riaz M., Petukhov V.I., Popov N.Yu., Tsatsakis A., Golokhvast K.S. Concentrating mill wastes are the source of pollution of human environment and natural ecosystems with heavy metals: a case study in Primorsky Krai, Russian Federation // Journal of Chemistry. 2020. Vol. 2020. 6570126. <https://doi.org/10.1155/2020/6570126>
23. Шарипов Д.Ш. Гидродинамические и гидростатические силы как факторы, влияющие на устойчивость хвостохранилищ // Геоэкология. 2021. Т. 44, № 1. С. 63–72. <https://doi.org/10.21285/2686-9993-2021-44-1-63-72>
24. Абдрахманов Р.Ф., Попов В.Г., Тугуши И.Н. Обменно-адсорбционные процессы в подземной гидросфере. Уфа: БНЦ УрО АН СССР, 1992. 156 с.
25. Николаев Е.Е., Голенков А.В., Мадянов И.В. Применение препаратов лития в психиатрической практике в контексте влияния на тиреоидный статус // Acta Medica Eurasica. 2023. № 2. С. 124–138. <https://doi.org/10.47026/2413-4864-2023-2-124-138>
26. Филов В.А. Бериллий и его соединения: окружающая среда, токсикология, гигиена // Рос. хим. журнал. 2004. Т. 48, Вып. 2. С. 76–86.

REFERENCES

1. Yurchenko S.G., Shul'kin V.M. Osobennosti khimicheskogo sostava pit'evykh vod g. Vladivostok = [Features of the chemical composition of drinking water in the city of Vladivostok]. *Vestnik of the FEB RAS*. 2010;(5):107–112. (In Russ.).
2. Trunova I.E., Zaretskaya S.V. Gigienicheskaya otsenka kachestva pit'evoy vody vo Vladivostoke = [Hygienic assessment of drinking water quality in Vladivostok]. *Tikhookeanskiy Meditsinskiy Zhurnal*. 2006;(3):64–66. (In Russ.).
3. Tarasenko I.A., Zinkov A.V. Ekologicheskie posledstviya mineralogo-geokhimicheskikh preobrazovaniy khvostov obogachivaniya Sn–Ag–Pb–Zn rud (Primorye, Dal'negorskij rayon) = [Ecological consequences of mineralogical-geochemical transformations of Sn–Ag–Pb–Zn ore enrichment tailings (Primorye, Dal'negorsk district)]. Vladivostok: Dal'nauka; 2001. 194 p. (In Russ.).
4. Bortnikova S.B., Gaskova O.L., Prisekina N.A. Geochemical estimation of the potential danger of waste rocks from the Veduginskoe deposit. *Geochemistry International*. 2010;48(3):280–294.
5. Tarasenko I.A., Kharitonova N.A., Ovodova E.V., Zin'kov A.V., Korzun A.V. Transformatsiya mineralogo-geokhimicheskogo sostava otkhodov obogachivaniya i yeye vliyanie na formirovaniye vysokomineralizovannykh vod (Primorskiy kray, Rossiya) = [Transformation of the mineralogical and geochemical composition of tails and its influence on the high mineralization water origination (Primorye region, Russia)]. *Tikhookeanskaya Geologiya*. 2017;36(2):106–118. (In Russ.).
6. Krupskaya L.T., Orlov A.M., Golubev D.A., Kolobanov K.A., Filatova M.A. Otsenka ekologicheskoy opasnosti nakoplennykh otkhodov pererabotki mineraloidnogo syr'ya zakrytykh gornykh predpriyatiy

v Priamur'e i Primorye = [Assessment of environmental hazard of accumulated mineral processing waste of closed mining enterprises in the Amur river region and Primorye]. *Mining Science and Technology (Russia)*. 2020;5(3):208–223. (In Russ.). <https://doi.org/10.17073/2500-0632-2020-3-208-223>

7. Brzhanov R.T., Sofronova L.I. Khvostovye otlozheniya – istochnik ekologicheskikh problem = [Tailings as a source of environmental problems]. *Trudy Universiteta*. 2021;(1):72–77. (In Russ.). https://doi.org/10.52209/1609-1825_2021_1_72

8. Zlobin N.I. Otsenka zagrizazneniya vodnykh ob'ektorov zapovednika "Denezhkin Kamen" ot Shemurskogo mestorozhdeniya = [Assessment of the level of pollution of water bodies of the Denezhkin Kamen reserve by the Shemur field]. *XXI century. Technosphere safety*. 2021;6(4):395–407. (In Russ.). <https://doi.org/10.21285/2500-1582-2021-4-395-407>

9. Kurbnov M.D., Rastorguev A.V. Obosnovanie prognozov migrantsii dlya Digmaiskogo khvostokhranilishcha = [Justification of migration forecasts for the Digmaisk tailings storage]. *Vestnik Filiala Moskovskogo Gosudarstvennogo Universiteta imeni M.V. Lomonosova v gorode Dushanbe*. 2022;1(1):129–137. (In Russ.).

10. Semyachkov A.I., Potechun V.A., Semyachkov K.A. Gidrogeokologicheskie usloviya tekhnogenennykh podzemnykh vod v ob'ektaakh razmeshcheniya otkhodov = [Hydrogeoecological conditions of technogenic groundwater in waste disposal sites]. *Journal of Mining Institute*. 2023;260:168–179. (In Russ.). <https://doi.org/10.31897/PMI.2023.24>

11. Budarina V.A., Lisetskiy F.N., Kosinova I.I., Kurychev A.A. Osobennosti transformatsii podzemnoy gidrosfery v predelakh Stoyleneskogo gorno-promyshlennogo kompleksa = [Features of the transformation of the underground hydrosphere in the limits of the Tula mining complex]. *Geology, Geography and Global Energy*. 2024;(3):13–22. (In Russ.). https://doi.org/10.54398/20776322_2024_3_13

12. Komarov M.A., Aliskerov V.A., Kusevich V.I., Zavertkin V.L. Gorno-promyshlennye otkhody – dopolnitel'nyy istochnik mineraloidnogo syr'ya = [Mining industrial waste as an additional source of mineral resources]. *Mineral'nye Resursy Rossii. Ekonomika i Upravlenie*. 2007;(4):3–9. (In Russ.).

13. Gordienko P.S., Yarusova S.B., Krysenko G.F. et al. Pererabotka flyuoritsoderzhashchego mineraloidnogo syr'ya i otkhodov Yaroslavskogo gorno-obogatitel'nogo kombianata: monografiya = [Processing of fluorite-containing minerals and waste from the Yaroslavl Mining and Beneficiation Plant: monograph]. Moscow: RIOR, INFRA-M; 2018. 115 p. (In Russ.). <https://doi.org/10.12737/1734-0>

14. Fatov A.S., Likhnikievich E.G. Gidrokhimicheskaya tekhnologiya pererabotki khvostov obogachivaniya Yaroslavskogo GOK – real'nogo istochnika litievoj produktsii = [Hydrochemical technology for processing of Yaroslavl GOK enrichment tailings as a real source of lithium products]. *Trudy Kol'skogo Nauchnogo Tsentra RAN*. 2018;9(2-1):371–374. (In Russ.).

15. Ovchinnikov L.N. Prikladnaya geokhimiya = [Applied geochemistry]. Moscow: Nedra; 1990. 348 p. (In Russ.).

16. IARC Monographs on the Evaluation of Carcinogenic Risks to Humans. Vol. 58: Beryllium, Cadmium, Mercury, and Exposures in the Glass Manufacturing Industry. Lyon: IARC; 1993. P. 41–117.

17. Khudoley V.V. Kantserogeny: kharakteristiki, zakonomernosti, mekhanizmy deystviya = [Carcinogens: Characteristics, patterns, and mechanisms of action]. St. Petersburg: Nestor; 1999. 420 p. (In Russ.).

18. CICAD № 32. Beryllium and Beryllium Compounds. Geneva: WHO; 2001. 71 p.

19. Dobrovols'kiy V.V. Geografiya mikroelementov. Global'noye rasseyaniye = [Geography of trace elements. Global dispersion]. Moscow: Mysl'; 1983. 272 p. (In Russ.).

20. Eikhler V. Yady v nashey zhizni = [Poisons in our life]. Moscow: Mir; 1993. 192 p. (In Russ.).

21. Ivanov V.V. Ekologicheskaya geokhimiya elementov: Spravochnik: V 6 kn. = [Ecological geochemistry of elements: Handbook: in 6 vols]. Moscow: Nedra; 1994. Vol. 1: s-elements. 304 p. (In Russ.).

22. Tarasenko I.A., Zin'kov A.V., Kholodov A.S., Riaz M., Petukhov V.I., Popov N.Yu., Tsatsakis A., Golokhvast K.S. Concentrating mill wastes are the source of pollution of human environment and natural ecosystems with heavy metals: a case study in Primorsky Krai, Russian Federation. *Journal of Chemistry*. 2020;2020:6570126. <https://doi.org/10.1155/2020/6570126>

23. Sharipov D.Sh. Gidrodinamicheskie i gidrostaticheskie sily kak faktory, vliyayushchie na ustoychivost' khvostokhranilishch = [Hydrodynamic and hydrostatic forces as factors affecting tailing dump stability]. *Geocology*. 2021;44(1):63–72. (In Russ.). <https://doi.org/10.21285/2686-9993-2021-44-1-63-72>

24. Abdrahmanov R.F., Popov V.G., Tugushi I.N. Obmenno-adsorbsionnye protsessy v podzemnoy gidrosfere = [Exchange and adsorption processes in the underground hydrosphere]. Ufa: BNC UrO AN SSSR; 1992. 156 p. (In Russ.).

25. Nikolaev E.E., Golenkov A.V., Madyanov I.V. The use of lithium medications in psychiatric practice in the context of their effect on the thyroid status. *Acta Medica Eurasica*. 2023;2:124–138. <https://doi.org/10.47026/2413-4864-2023-2-124-138>

26. Filov V.A. Berylliy i yego soedineniya: okruzhayushchaya sreda, toksikologiya, gigiena = [Beryllium and its compounds: Environment, toxicology, hygiene]. *Rossiiskii Khimicheskii Zhurnal*. 2004;48(2):76–86. (In Russ.).

НАУКИ О ЗЕМЛЕ
И ОКРУЖАЮЩЕЙ СРЕДЕ

Научная статья

УДК 551.578.467+551.578.468

DOI: 10.7868/S3034530825050077

Дистанционный мониторинг снежной толщи с помощью температурной рейки

М.В. Михалев[✉], Л.Е. Музыченко, В.А. Лобкина

Михаил Викторович Михалев

кандидат географических наук, научный сотрудник

Дальневосточный геологический институт ДВО РАН, Владивосток, Россия

mvmikhaliov@yandex.ru

<http://orcid.org/0000-0002-5746-3423>

Леонид Евгеньевич Музыченко

младший научный сотрудник

Дальневосточный геологический институт ДВО РАН, Владивосток, Россия

allixev@yandex.ru

<http://orcid.org/0000-0001-5363-0397>

Валентина Андреевна Лобкина

кандидат географических наук, старший научный сотрудник

Дальневосточный геологический институт ДВО РАН, Владивосток, Россия

valentina-lobkina@yandex.ru

<http://orcid.org/0000-0002-8916-0910>

Аннотация. В работе рассмотрена возможность применения температурной рейки для осуществления непрерывного мониторинга состояния снежной толщи. На основе полученных данных после проведения анализа зон температурного скачка на графике хода температур выявлены признаки таяния снежного покрова. Также установлен градиент роста ледяных кристаллов. Выполнена оценка возможности использования данных дистанционного мониторинга температуры снежной толщи для оценки плотности ее слоев и снегозапаса.

Ключевые слова: снежный покров, мониторинг температуры, ледяные кристаллы

Для цитирования: Михалев М.В., Музыченко Л.Е., Лобкина В.А. Дистанционный мониторинг снежной толщи с помощью температурной рейки // Вестн. ДВО РАН. 2025. № 5. С. 97–103. <http://dx.doi.org/10.7868/S3034530825050077>

Финансирование. Работа выполнена в рамках государственного задания Минобрнауки России для ДВГИ ДВО РАН.

Snow patch remote monitoring with the thermistor chain usage

M.V. Mikhalev, L.E. Muzychenko, V.A. Lobkina

Mikhail V. Mikhalev

Candidate of Sciences in Geography, Researcher
 Far East Geological Institute, FEB RAS, Vladivostok, Russia
 mvmikhaliou@yandex.ru
<http://orcid.org/0000-0002-5746-3423>

Leonid E. Muzychenko

Junior Researcher
 Far East Geological Institute, FEB RAS, Vladivostok, Russia
 allixev@yandex.ru
<http://orcid.org/0000-0001-5363-0397>

Valentina A. Lobkina

Candidate of Sciences in Geography, Senior Researcher
 Far East Geological Institute, FEB RAS, Vladivostok, Russia
 valentina-lobkina@yandex.ru
<http://orcid.org/0000-0002-8916-0910>

Abstract. The authors reviewed ability of thermistor chain usage for continuous remote snow patch condition monitoring. After analysis of derived data on jump zones in temperature curve, signs of snow patch melting were found out. The gradient of ice crystals growth was also defined. In addition, applicability of snow patch temperature remote monitoring data for evaluation of snow patch layers density and water reserve was examined.

Keywords: snow patch, temperature monitoring, ice crystals

For citation: Mikhalev M.V., Muzychenko L.E., Lobkina V.A. Snow patch remote monitoring with the thermistor chain usage. *Vestnik of the FEB RAS*. 2025;(5):97–103. (In Russ.).
<http://dx.doi.org/10.7868/S3034530825050077>

Funding. The work was carried out within the framework of the state assignment of the Ministry of Science and Higher Education of the Russian Federation for the Far East Geological Institute, FEB RAS.

Введение

Вопрос о распределении температур в снежной толще и скорости снеготаяния является одним из наиболее актуальных в современной гидрологии. Прогнозирование периодов и объемов массовой водоотдачи при таянии снежной толщи позволит максимально эффективно планировать и проводить мероприятия в период половодья. Основными факторами, влияющими на распределение температуры в снежной толще, являются изменчивость температуры воздуха, характер и температура подстилающей поверхности, стратиграфия снежного покрова. На настоящий момент существует более 20 различных эмпирических зависимостей, описывающих корреляцию между коэффициентом теплопроводности снега и плотностью снежной толщи в различных условиях [1–3]. При этом для оценки теплозащитных свойств снежного покрова используется термическое сопротивление Rs , равное отношению толщины снежного покрова hs к коэффициенту эффективной теплопроводности снега λ_s . Таким образом, натурное определение коэффициента эффективной теплопроводности и получение данных по распределению температуры в снежной толще являются важными задачами, решаемыми при выявлении теплозащитных свойств снега. Распределение

температурных полей в снежной толще обуславливает в том числе и скорость процессов перекристаллизации и метаморфизма снега [4]. Возникновение характерных кристаллических структур влияет на диффузию водяного пара внутри снежной толщи, что увеличивает или уменьшает теплопроводность как отдельных слоев, так и толщи снега в целом.

Значения коэффициентов теплопроводности, установленные различными авторами, заметно различаются. Например, для плотности снега 0,19 г/см³ коэффициент теплопроводности по Миддендорфу в 2 раза меньше аналогичного коэффициента, полученного С.А. Арцыбашевым [5]. Это несоответствие указывает на недостаточную на данный момент изученность теплопроводности снега и ее зависимости от плотности снега. Таким образом, существует необходимость натурного определения данных параметров.

Получение массива данных о температуре снежной толщи при полевых работах представляет собой сложную задачу. Ртутные термометры имеют высокую точность, но снятие результата должно происходить моментально, так как показания начинают резко изменяться при смене среды. К тому же данные термометры очень хрупкие, что необходимо учитывать при их размещении в плотном снегу или между корок различного генезиса. Электронные термометры быстро выходят из строя и после сезона активных полевых работ начинают давать расхождения данных при отрицательных значениях, введение поправок не меняет ситуацию, поскольку в зависимости от температуры воздуха величина искажения меняется. Более сложные приборы, такие как пирометры и тепловизоры, снимают показания со стенки шурфа, однако после вскрытия стенка быстро оплавляется, и реальные величины температуры сильно отличаются от показаний, снимаемых со вскрытой поверхности.

Особый интерес представляет не разовое измерение температуры снежной толщи, а продолжительная запись изменений температуры в определенном слое или на конкретной глубине снежной толщи. Это позволяет сделать температурные логгеры и инвазивные устройства постоянного мониторинга температуры снежной толщи.

Таким образом, целью исследования является оценка возможности использования температурной рейки при ведении дистанционного мониторинга температуры снежной толщи для определения периодов активного таяния и величины снегозапаса.

Методика исследований

В соответствии с целью работы на опытной площадке в границах г. Южно-Сахалинска была установлена термокоса с температурными датчиками, расположенными через каждые 2 см начиная от поверхности почвы. По средствам стационарной системы долговременных автоматических измерений и регистрации температуры снега проводился постоянный мониторинг состояния снежной толщи. Микроконтроллер через цифровой интерфейс опрашивал температурные датчики, расположенные на инвазивной рейке, и передавал полученные сведения на электронный носитель. Погрешность датчиков измерения температуры составляет не более $\pm 0,1$ °С. Данная система позволила точно определить время начала активного снеготаяния и слои активной водоотдачи. После установки и включения термокосы производилась непрерывная запись показаний с датчиков на электронный носитель с дискретностью 30 с.

Период проведения работ – зимние сезоны с 2018 по 2024 г., параллельно проводились натурные наблюдения структуры и текстуры снежной толщи, определялись плотность слоев снежной толщи, размеры ледяных кристаллов.

Особое внимание уделялось плотности снежного покрова, так как одной из задач исследования была оценка возможности установления плотности снежной толщи через величину теплопроводности.

Величина теплопроводности коррелирует с плотностью снежного покрова – коэффициент теплопроводности снега является функцией от его плотности [6, 7]. При этом у разных авторов эмпирические зависимости значительно отличаются друг от друга. Для оценки возможности определения величины плотности снежного покрова исходя из показаний температурной рейки проводился сравнительный анализ данных, полученных по различным методикам выявления зависимости величины теплопроводности от плотности снега (табл. 1).

Таблица 1

Формулы зависимости величины теплопроводности от плотности снега

Метод	Формула
Уравнение Абельса	$\lambda = 0,0068\rho^2$
Зависимость Б.В. Прокурякова	$\lambda = 0,02093 + 1,01\rho$
Зависимость А.В. Павлова	$\lambda = 0,00349 + 0,000352\rho - 2,6 \cdot 10^{-7}\rho^2 + 2,62 \cdot 10^{-9}\rho^3$
Формула Н.И. Шендера	$\lambda = 0,06 + 0,564\rho + 1,31\rho^2$
Формула Н.И. Осокина	$\lambda = 9,165 \cdot 10^{-2} - 3,814 \cdot 10^{-4}\rho + 2,905 \cdot 10^{-6}\rho^2$
Формула И.К. Янсона	$\lambda = 0,00005 + 0,0019\rho + 0,006\rho^4$

Расчет теплопроводности осуществлялся по формуле Пуассона по средствам измерения амплитуды колебаний температуры слоя снежной толщи

$$\lg A_x = \lg A_0 - B_x,$$

где A_x – амплитуда температур в слое x ; A_0 – амплитуда температур на поверхности;

$$B = \lg e \frac{1}{a} \sqrt{\frac{\pi}{T}}; \quad a^2 = \frac{\pi(\lg e)}{TB^2};$$

a – коэффициент теплопроводности; T – период наблюдения.

Результаты исследований

Анализ данных, полученных с термокосы, позволяет установить период начала активного снеготаяния по резким скачкам температуры в снежной толще. Данные скачки (рис. 1), по мнению авторов, объясняются просачиванием и последующим замерзанием талой воды в снеге. Такое просачивание характерно для периода максимальной водоотдачи снежного покрова. Температурные скачки фиксировались во всех зимних сезонах наблюдений, в которых использовалась термокоса.

Рассмотрим скачки температуры в период водоотдачи за 2018 г. (см. рис. 1). Амплитуда температур до 06.04 в слое снега, расположенного на высоте 10 см от подстилающей поверхности, составляла в среднем 0,2 °C, затем амплитуда температур с 06.04 по 10.04 увеличилась до 3 °C. В период с 11.04 по 13.04 наблюдалась отрицательные дневные температуры, что остановило процесс таяния, и амплитуда температур в слое на высоте 10 см уменьшилась до 0,2 °C. С 13.04 процесс таяния возобновился, и амплитуда температур возросла, а к 15.04 сравнялась с амплитудой температур в атмосфере.

Данный метод можно использовать для прогнозирования начала половодья и информирования заинтересованных структур.

Температурный градиент в снежной толще определяет динамику роста ледяных кристаллов. После определения с помощью термокосы амплитуды температур в слоях снежной толщи был проведен сравнительный анализ скорости роста ледяных кристаллов (рис. 2). Для анализа был выбран слой, расположенный на высоте 10 см от поверхности почвы. Анализ показал, что максимальный рост размера кристаллов наблюдался в период с 03.01 по 17.01.2018 г. Именно в данный период отмечается резкое изменение амплитуды температур в исследуемом слое (с 4 до 11 °C). Затем при уменьшении амплитуды температур

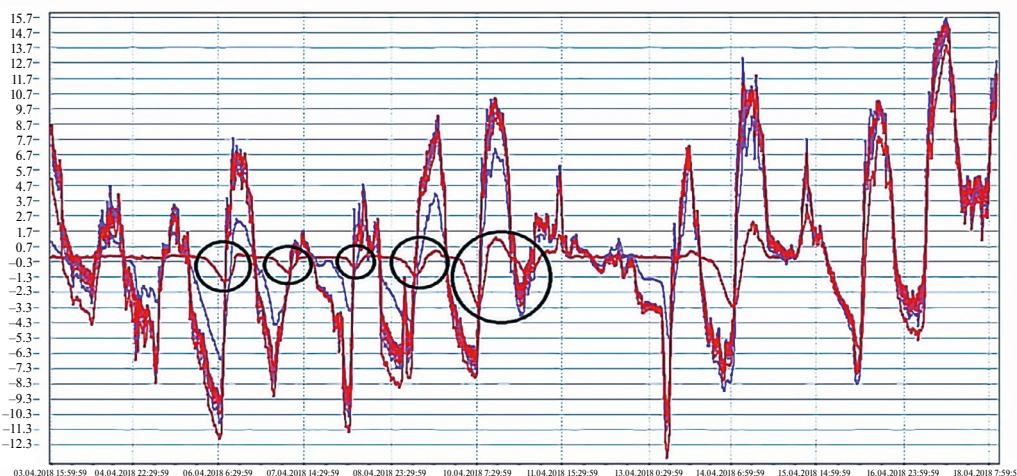


Рис. 1. Данные хода температур в снежной толще на разных глубинах. Выделенные участки показывают просачивание талых вод в нижние слои снежной толщи

замедляется и рост кристаллов. Таким образом, максимальная скорость роста ледяных кристаллов наблюдалась в зоне температурного скачка.

Результаты сравнения плотности снежного покрова, полученной дистанционным методом через измерение теплопроводности, с плотностью, определенной при натурных измерениях, показывают, что в условиях Южного Сахалина наиболее точные данные дают формулы Н.И. Шендера, Н.И. Осокина, а также зависимость Б.В. Проскурякова. Для плотностей снега менее 0,1 г/см³ предпочтительно использовать зависимость Б.В. Проскурякова и эмпирическую формулу Н.И. Осокина, при более высоких плотностях – зависимость Б.В. Проскурякова (табл. 2).

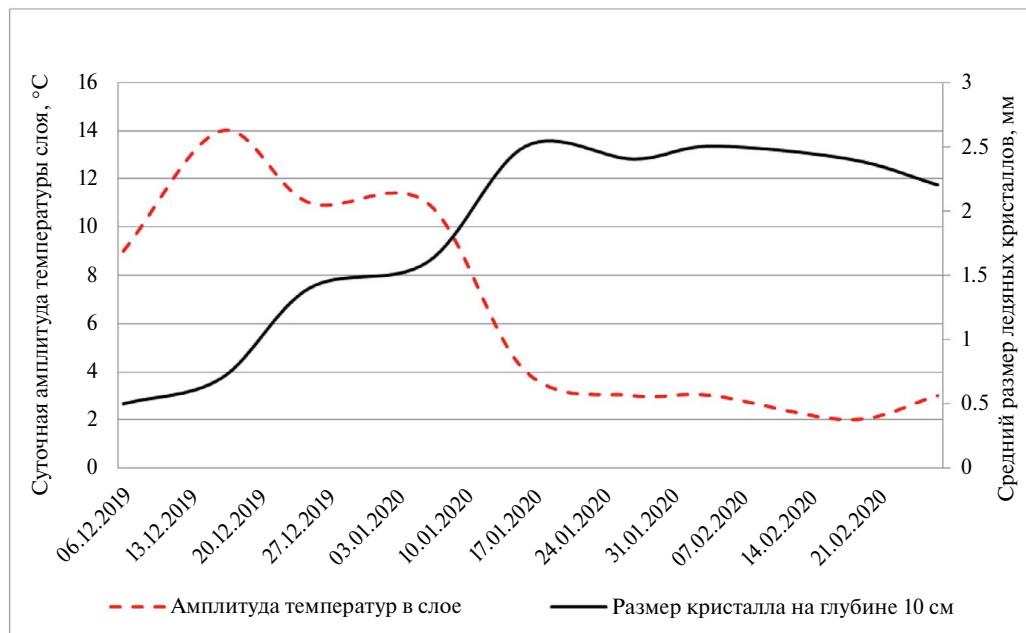


Рис. 2. Динамика роста ледяных кристаллов на глубине 10 см в зависимости от суточной амплитуды температур в слое снежной толщи

Таблица 2

Разница между показателями плотности, полученными по различным эмпирическим закономерностям, и натурно измеренными величинами, %

Плотность, г/см ³	Зависимость Б.В. Проскурякова	Формула Н.И. Шендера	Формула Н.И. Осокина
До 0,1	+32	+55	+36
0,1–0,14	+18	+22	-22
0,15–0,19	+13	+14	-45
0,2–0,24	+10	+12	-58
0,25–0,29	+8	+14	-66
0,3–0,34	+7	+17	-71
Более 0,35	+1,5	+13	-75

Выводы

Применение систем дистанционного мониторинга температуры снежной толщи позволяет оперативно определять время и интенсивность снеготаяния, а также выявлять активные слои водоотдачи через температурные скачки, которые можно отследить в реальном времени.

К началу периода снеготаяния по всей толще температура снега выравнивается, градиенты уменьшаются до десятых долей градуса на сантиметр.

Использование инвазивной рейки также дает возможность определить и амплитуду хода температур в конкретных слоях снежной толщи, что позволяет сделать прогноз динамики роста ледяных кристаллов в снежной толще. Это, в свою очередь, показывает вероятность образования ослабленных слоев разрыхления. Получение данных о времени формирования ослабленных слоев снежной толщи делает более точным прогноз времени и вероятности формирования лавин эпигенетического класса.

Расчет теплопроводности снега показывает возможность применения температурной рейки при прогнозировании снегозапаса. Для свежевыпавшего снега наиболее точные значения плотности показала формула Н.И. Осокина. При средних плотностях снега около 0,35 г/см³ наиболее эффективным видится использование эмпирической зависимости Б.В. Проскурякова. Таким образом, на период максимальных снегозапасов наиболее точные значения дает зависимость Б.В. Проскурякова.

СПИСОК ИСТОЧНИКОВ

1. Осокин Н.И., Сосновский А.В., Накалов П.Р., Ненашев С.В. Термическое сопротивление снежного покрова и его влияние на промерзание грунта // Лёд и Снег. 2013. № 1 (121). С. 93–103.
2. Факаева Н.Р., Демежко Д.Ю., Горностаева А.А., Хацкевич Б.Д. Теплофизические характеристики снежного покрова Екатеринбурга // Криосфера Земли. 2025. Т. 29, № 2. С. 64–73.
3. Балобаев В.Т. Геотермия мерзлой зоны литосферы севера Азии. Новосибирск: Наука, 1991. 193 с.
4. Войтковский К.Ф., Голубев В.Н., Сазонов А.В., Сократов С.А. Новые данные о коэффициенте диффузии водяного пара в снеге // МГИ. 1988. № 63. С. 76–81.
5. Борисов В.А., Акинин Д.В., Гасилина М.А., Романова А.Р. Теплопроводность снежного покрова и физические процессы, происходящие в нем под влиянием температурного градиента // Resources and Technology. 2023. Т. 20 (4). С. 45–73.
6. Котляков В.М., Сосновский А.В., Осокин Н.И. Оценка коэффициента теплопроводности снега по его плотности и твердости на Западном Шпицбергене // Лёд и Снег. 2018. Т. 58, № 3. С. 343–352.

7. Осокин Н.И., Сосновский А.В., Чернов Р.А. Коэффициент теплопроводности снега и его изменчивость // Криосфера Земли. 2017. Т. 21, № 3. С.60–68.

REFERENCES

1. Osokin N.I., Sosnovskij A.V., Nakalov P.R., Nenashev S.V. Termicheskoe soprotivlenie snezhnogo pokrova i ego vliyanie na promerzanie grunta. *Lyod i Sneg*. 2013;121(1):93–103. (In Russ.).
2. Fakaeva N.R., Demezhko D.Yu., Gornostaeva A.A., Khaczkevich B.D. Teplofizicheskie harakteristiki snezhnogo pokrova Ekaterinburga. *Kriosfera Zemli*. 2025;29(2):64–73. (In Russ.).
3. Balobaev V.T. Geotermiya merzloj zony litosfery severa Azii. Novosibirsk: Nauka; 1991. 193 p. (In Russ.).
4. Vojtkovskij K.F., Golubev V.N., Sazonov A.V., Sokratov S.A. Novye dannye o koeficiente diffuzii vodyanogo para v snege. *MGI*. 1988;63:76–81. (In Russ.).
5. Borisov V.A., Akinin D.V., Gasilina M.A., Romanova A.R. Teploprovodnost snezhnogo pokrova i fizicheskie processy, proixodyashchie v nem pod vliyaniem temperaturnogo gradienta. *Resources and Technology*. 2023;20(4):45–73. (In Russ.).
6. Kotlyakov V.M., Sosnovskij A.V., Osokin N.I. Ocenka koeficiente teploprovodnosti snega po ego plotnosti i tverdosti na Zapadnom Shpiczbergene. *Lyod i Sneg*. 2018;58(3):343–352. (In Russ.).
7. Osokin N.I., Sosnovskij A.V., Chernov R.A. Koeficient teploprovodnosti snega i ego izmenchivost. *Kriosfera Zemli*. 2017;21(3):60–68. (In Russ.).

НАУКИ О ЗЕМЛЕ
И ОКРУЖАЮЩЕЙ СРЕДЕ

Научная статья

УДК 550.34.01

DOI: 10.7868/S3034530825050088

Калибровка и апробация новой магнитудной шкалы на примере сильного корового землетрясения 01.01.2024 в Японии ($Mw = 7,5$)

А.В. Коновалов, И.Д. Орлин, Ю.А. Степнова✉

Алексей Валерьевич Коновалов

кандидат физико-математических наук, ведущий научный сотрудник
Дальневосточный геологический институт ДВО РАН, Владивосток, Россия
a.konovalov@geophysTech.ru
<https://orcid.org/0000-0003-2997-1524>

Илья Дмитриевич Орлин

инженер
Дальневосточный геологический институт ДВО РАН, Владивосток, Россия
office@geophysTech.ru

Юлия Андреевна Степнова

кандидат геолого-минералогических наук, старший научный сотрудник
Дальневосточный геологический институт ДВО РАН, Владивосток, Россия
stepnova@fegi.ru
<https://orcid.org/0000-0001-5263-5161>

Аннотация. На примере корового землетрясения в Японии ($Mw = 7,5$, 01.01.2024) и его афтершоков проведены измерения и анализ параметров сильных движений грунта, в том числе интенсивности по Ариасу. Интенсивность Ариаса является одной из главных физических метрик, используемых в инженерной сейсмологии. Уровень интенсивности Ариаса непосредственно связан со сброшенным напряжением в очаге землетрясения, поэтому разработка и калибровка магнитудной шкалы, учитывающей не только размеры разрыва, но и сброщенное напряжение в очаге землетрясения, является актуальной задачей сейсмологических наблюдений. В настоящей работе апробирована новая магнитудная шкала (Mа3), основанная на модифицированной интенсивности Ариаса. Калибровка шкалы выполнена по средним и умеренным землетрясениям в целевом регионе ($M \sim 5$). Высокую эффективность предложенной шкалы подтверждают оценки магнитуды, полученные по новой методике, которые близки к моментной магнитуде (Mw).

Ключевые слова: магнитуда, землетрясение, сброщенное напряжение, интенсивность по Ариасу, тектоника

Для цитирования: Коновалов А.В., Орлин И.Д., Степнова Ю.А. Калибровка и апробация новой магнитудной шкалы на примере сильного корового землетрясения 01.01.2024 в Японии ($Mw = 7,5$) // Вестн. ДВО РАН. 2025. № 5. С. 104–115. <http://dx.doi.org/10.7868/S3034530825050088>

Финансирование. Работа выполнена в рамках государственного задания Минобрнауки России для ДВГИ ДВО РАН.

Original article

Calibration and testing of a new magnitude scale: the case study of a strong crustal earthquake on 01.01.2024 in Japan (Mw = 7,5)

A.V. Konovalov, I.D. Orlin, Yu.A. Stepnova

Alexey V. Konovalov

Candidate of Sciences in Physics and Mathematics, Leading Researcher
Far East Geological Institute, FEB RAS, Vladivostok, Russia
a.konovalov@geophys.tech.ru
<https://orcid.org/0000-0003-2997-1524>

Ilya D. Orlin

Engineer
Far East Geological Institute, FEB RAS, Vladivostok, Russia
office@geophys.tech.ru

Yulia A. Stepnova

Candidate of Sciences in Geology and Mineralogy, Senior Researcher
Far East Geological Institute, FEB RAS, Vladivostok, Russia
stepnova@fegi.ru
<https://orcid.org/0000-0001-5263-5161>

Abstract. A crustal earthquake and its aftershocks that occurred in Japan (Mw = 7,5, 01.01.2024) were studied to make measurements and analyze the parameters of strong ground motion, including the Arias intensity. The latter is one of the key physical parameters used in engineering seismology. The level of the Arias intensity is directly connected with the stress drop in an earthquake source. Therefore, developing and calibrating a magnitude scale that would take into account not only fault dimensions, but also the stress drop in an earthquake source is a vital task of seismological observations. In this paper we present our test results of a new magnitude scale (MIA3) based on a modified Arias intensity. The scale was calibrated to medium and moderate earthquakes in the target area (M ~5). The high efficiency of the proposed scale is evidenced by the magnitudes, determined through the new method, that are almost consistent with the moment magnitude (Mw).

Keywords: magnitude, earthquake, stress drop, Arias intensity, tectonics

For citation: Konovalov A.V., Orlin I.D., Stepnova Yu.A. Calibration and testing of a new magnitude scale: the case study of a strong crustal earthquake on 01.01.2024 in Japan (Mw = 7,5). *Vestnik of the FEB RAS*. 2025;(5):104-115. (In Russ.). <http://dx.doi.org/10.7868/S3034530825050088>

Funding. The work was carried out within the framework of the state assignment of the Ministry of Science and Higher Education of the Russian Federation for the Far East Geological Institute, FEB RAS.

Введение

Определение магнитуды землетрясения является актуальной задачей в наши дни. Для ее решения сейсмологи разрабатывают новые или модифицируют существующие магнитудные шкалы. Разные шкалы магнитуд, как правило, отражают различные аспекты очагового процесса.

Так, при разработке моделей затухания сильных движений грунта важным фактором является выбор типа магнитудной шкалы. Обычно в количественных оценках сейсмической опасности и риска используется шкала моментной магнитуды [1], принятая в качестве эталонной. При этом считается, что моментная магнитуда отражает размер очага.

Как показывают последние исследования, амплитудный уровень сейсмических колебаний достаточно тесно коррелирует с характеристикой сброшенного напряжения в очаге землетрясения [2–5]. По этому поводу были высказаны идеи об использовании в оценках сейсмической опасности одновременно двух типов магнитуд: моментной и энергетической [4].

Моментная магнитуда оценивается по амплитудам сейсмических колебаний в низкочастотной области (см., например, [6]). Энергетическая магнитуда определяется преимущественно высокочастотным спектром [3, 7] и, как уже сказано, отождествляется со сброшенным напряжением в очаге землетрясения. В связи с этим разработка и калибровка магнитудной шкалы, учитывающей не только размеры, но и сброшенное напряжение в очаге землетрясения, является важной задачей инженерной сейсмологии.

В работе [8] предложена и физически обоснована новая магнитуда по измерениям интенсивности Ариаса в приочаговой зоне землетрясения. Как отмечено в упомянутой работе, инженерная метрика движений грунта (интенсивность Ариаса) отражает физические характеристики очага, в том числе сброшенное напряжение.

В настоящей работе для тестирования новой магнитудной шкалы, основанной на интенсивности Ариаса, рассматривается достаточно сильное землетрясение, произошедшее 1 января 2024 г. в Японии, магнитуда которого, по версии Японского метеорологического агентства (JMA), составила 7,6, а моментная магнитуда $Mw = 7,5$.

Метод исследования

В работе [8] показано, что в приближении точечного источника квадрат высокочастотной полочки спектра ускорений пропорционален интенсивности Ариаса с учетом функций, описывающих затухание и геометрическое расхождение сейсмических волн на всей трассе их распространения. Для калибровки спектральной магнитуды предлагается использовать модифицированную метрику интенсивности Ариаса (Ia3):

$$Ia3 = \frac{\pi}{2g} \int_0^T [a_{HP3}(t)]^2 dt, \quad (1)$$

где $a_{HP3}(t)$ – запись ускорения после применения высокочастотного фильтра Баттерворта 2-го порядка с граничной частотой 3 Гц; T – длина записи; модифицированная интенсивность по Ариасу рассчитывается на горизонтальных каналах, результаты суммируются.

В качестве примера на рис. 1 показаны записи землетрясения и результаты вычисления параметра Ia3 как функции от временного окна обработки. Как видно из рис. 1, временное окно, в пределах которого содержится 95% от общей энергии сигнала, составляет около 20–30 с для землетрясения с магнитудой $Mw = 7,5$. За пределами этого окна метрика Ia3 резко замедляет свой рост. Приведенные оценки характеризуют продолжительность высокочастотных колебаний рассматриваемого землетрясения.

Аналитическое представление уравнения затухания интенсивности Ia3 в рамках модели очага с фрагментарными неровностями, являющимися источниками высокочастотного некогерентного излучения [8], имеет вид

$$\lg Ia3 = Mw - 2\zeta \lg r - br - f_{kappa} - c, \quad (2)$$

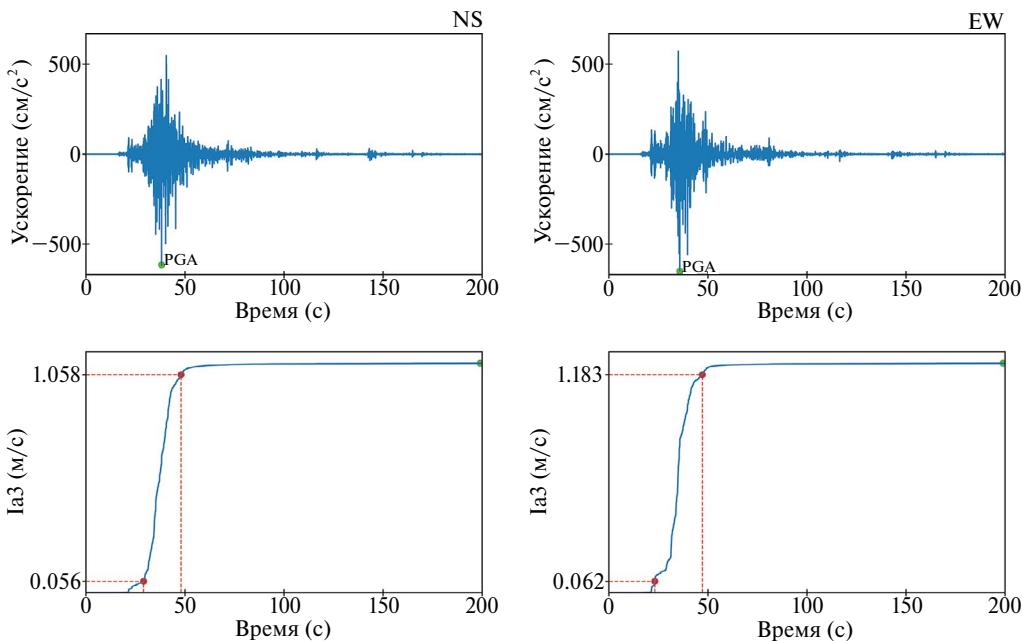


Рис. 1. Примеры акселерограмм и соответствующих им временных историй Ia3 землетрясения 01.01.2024 г. ($M_w = 7,5$) в Японии. Станция – ISK015, эпицентрическое расстояние составляет 39,8 км. На верхних графиках кружками обозначены амплитудные измерения пикового ускорения грунта (PGA), на нижних – пунктирными линиями отмечены амплитудные измерения и временные отметки, соответствующие 5 и 95% длительности сигнала

где $Ia3$ – модифицированная интенсивность Ариаса, M_w – моментная магнитуда землетрясения, ζ – показатель геометрического расхождения фронта S -волны, r – гипоцентрическое расстояние, b – характеристика неупругого затухания на всей трассе распространения S -волны, определяемая средним декрементом затухания в полосе частот 3–10 Гц; f_{kappa} – характеристика «станционного» затухания S -волны, c – коэффициент, определяемый материальными параметрами в области очага и пункта измерения, а также сброшенным напряжением на неоднородностях (asperity ($\Delta\tau$)).

Функция f_{kappa} задается следующим выражением:

$$f_{kappa} = \lg \left(2\kappa\pi \exp \left(2\pi\kappa f_H \right) \right), \quad (3)$$

где κ – коэффициент «станционного» затухания S -волны.

Параметр c определяется формулой

$$c = \lg \left\{ \left(\frac{16}{7} \right)^{2/3} \frac{gp^2 \beta^2 R_0^2}{\pi F^2 Am k_f^{1/3} \Delta\tau^{4/3}} \right\} - \frac{18,2}{3}. \quad (4)$$

Расшифровка и значения физических констант приведены в таблице. Константы используются для оценки сброшенного напряжения ($\Delta\tau$) согласно (4).

Процесс калибровки новой магнитуды, которая названа МПа3, заключается в подборе коэффициентов модели затухания (в приближении точечного источника) для заданного региона с использованием моментной магнитуды в качестве входного параметра. Неизвестными параметрами являются: 1) коэффициент геометрического расхождения – ζ ; 2) харак-

Таблица

Физические характеристики, используемые в оценках сброшенного напряжения

Параметр	Значение	Расшифровка
g	9,81 м/с ²	Ускорение свободного падения
ρ	2700 кг/м ³	Плотность среды в области очага землетрясения
β	3300 м/с	Скорость S -волн в области очага землетрясения
R_0	1000 м	Опорное расстояние
F	2 отн. ед.	Коэффициент, учитывающий отражение S -волн от свободной поверхности
k_f	0,2 отн. ед.	Коэффициент заполнения неровностей
\overline{Am}	2 отн. ед.	Различие в импедансах в очаге и под станцией в полосе частот 3–10 Гц

теристика неупругого затухания – b ; 3) свободный коэффициент – c . Найденные коэффициенты являются калибровочными.

К неизвестным параметрам также следует отнести коэффициент затухания в верхней части среды (κ), который целесообразно оценивать исходя из спектральной подгонки. В работе [9] по большому количеству данных японской сейсмологической сети KiK-net получена экспериментальная зависимость, согласно которой κ монотонно убывает с ростом V_{S30} в диапазоне $155 < V_{S30} < 2000$ м/с. Поэтому для параметризации «каппа-эффекта» при калибровке и оценках магнитуды используются данные о V_{S30} вместе с упомянутыми эмпирическими зависимостями. Формула для оценки «каппа-параметра» согласно работе [9] имеет следующий вид:

$$\ln \kappa_0 = \begin{cases} -0,18 (\ln 155)^2 + 1,816 \ln 155 - 7,38, 100 \text{ м/с} < V_{S30} < 155 \text{ м/с} \\ -0,18 (\ln V_{S30})^2 + 1,816 \ln V_{S30} - 7,38, 155 \text{ м/с} < V_{S30} < 2000 \text{ м/с} \\ -0,18 (\ln 2000)^2 + 1,816 \ln 2000 - 7,38, 2000 \text{ м/с} < V_{S30} < 3000 \text{ м/с} \end{cases}. \quad (5)$$

Неизвестные коэффициенты модели (2) находятся обычной регрессией. Помимо среднеквадратичного отклонения (σ) оценивался коэффициент детерминации (R^2). После того как все неизвестные коэффициенты для целевого региона определены, оценка магнитуды производится следующим образом:

$$MIA3 = \frac{1}{N} \sum_{i=1}^N \left\{ \lg Ia3_i + 2\zeta \lg r + br_i + c + f_{kappa}(V_{S30,i}) \right\}, \quad (6)$$

где индекс i относится к пункту измерения, N – количество доступных записей для заданного землетрясения, $V_{S30,i}$ – стационарная скорость в i -м пункте.

Район исследований

Исследуемое землетрясение произошло 1 января 2024 г. в 07:10:09 (UTC) вблизи северной оконечности п-ова Ното (о-в Хонсю, Япония). Согласно данным Геологической службы США (USGS), моментная магнитуда землетрясения составила $Mw = 7,5$, магнитуда по объемным волнам – $mb = 6,9$, магнитуда по поверхностным волнам – $Ms20 = 7,2$ [10].

Японское сейсмологическое агентство (F-Net) [11] приводит следующие параметры магнитуд: $Mw = 7,5$, $Mj = 7,6$.

Землетрясение произошло в пределах разлома взбросового типа Суцу-Оки/Suzu-oki (ранее известного как Нороши-Оки/Noroshi-oki) [12], относящегося к системе активных разломов западного побережья Японии. Разлом простирается с северо-востока на юго-запад, с падением на юго-восток, угол падения составляет 60° . Правосторонние сдвиговые перемещения определяют кинематику разломной зоны [13]. Параметры разрыва, согласно модели конечного разлома [14], составили: угол падения – 35° , угол простирания – 51° . Очаг землетрясения характеризуется близгоризонтальным напряжением сжатия. Тип подвижки – взброс с осью сжатия СЗ–ЮВ-направления.

В целом район п-ова Ното характеризуется крайне неоднородной структурой земной коры [15], в основном состоит из неогеновых вулканокластических и осадочных пород, перекрывающих палеозойские и мезозойские породы фундамента. Данный участок (север п-ова Ното) проявляет сейсмическую активность с ноября 2020 г., включая роевые события. В прибрежной зоне со стороны северного побережья п-ова Ното выделяется активная зона разломов, состоящая из четырех сегментов, расположенных с востока на запад соответственно: Суцу-Оки/Suzu-oki (длиной 21 км), Вадзима-Оки/Wajima-oki (21 км), Саруяма-Оки/Saruoya-oki (32 км) и Мондзен-Оки/Monzen-oki (23 км), которые тектонически взаимосвязаны и действуют как единый разлом, движущийся по принципу цепной реакции (рис. 2).

Исходные данные

В расчетах использовались сейсмические записи открытой японской базы данных Strong-motion Seismograph Kyoshin/Kiban Kyoshin Networks, состоящей из двух подсетей, K-NET и KiK-net. Сеть сейсмографов, объединенная в одну систему, насчитывает более тысячи станций в наземном и скважинном исполнениях. Данные доступны на сайте [17] после регистрации и аутентификации.

Исходные данные условно разделены на две выборки – калибровочную и валидационную. К калибровочной выборке относятся записи землетрясений с магнитудой Mw от 4,6 до 5,3

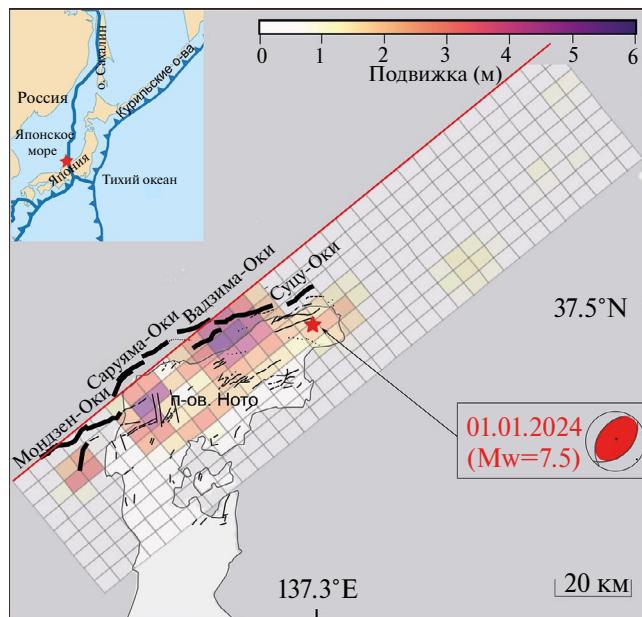


Рис. 2. Фрагмент поверхностной проекции сегментов разрыва с данными о распределении финальной подвижки на плоскости разрыва 1 января 2024 г. в 07:10:09 (UTC) согласно решению USGS [16]. Жирными линиями выделены разломы, которые ассоциируются с главным событием

(афтершоки землетрясения 01.01.2024 г.), по которым оценивались физические характеристики очага и среды. На рис. 3 графически проиллюстрирован результат статистической подгонки с помощью нормализации к магнитуде $Mw = 5$ в соответствии с моделью (2). В калибровочную выборку вошли записи 14 событий.

Около 40 афтершоков с магнитудой Mw от 3,5 до 5,9, а также главное событие с $Mw = 7,5$ составили основу валидационной выборки.

В объединенном наборе данных, включающем калибровочную и валидационную выборки, моментная магнитуда (Mw) варьируется от 3,5 до 7,5, «станционная» скорость S -волн (V_{S30}) – от 643 до 1134 м/с. Гипоцентральное расстояние варьируется от 10 до 400 км. В общей сложности обработано около 1500 сейсмических записей. Количество используемых сейсмических станций составило чуть более 200 пунктов.

В японской базе данных для каждого пункта наблюдений приводится развернутый скоростной разрез. В этом случае для оценки средней скорости S -волны в верхнем 30-метровом грунтовом слое (V_{S30}) привлекалось выражение

$$V_{S30} = \frac{z}{\sum_i \frac{z_i}{v_i}}, \quad (7)$$

где z_i – мощность i -го слоя, v_i – скорость поперечных волн в i -м слое, z – общая мощность, равная 30 м.

Результаты исследований

Приведем коэффициенты модели затухания для метрики Ia3 (в угловых скобках – среднее по калибровочной выборке данных):

Коэффициент (параметр)	Значение
ζ	$1,0931 \pm 0,1573$
b	$0,0062 \pm 0,0012$
c	$4,3186 \pm 0,5116$
σ	0,665
R^2	0,617

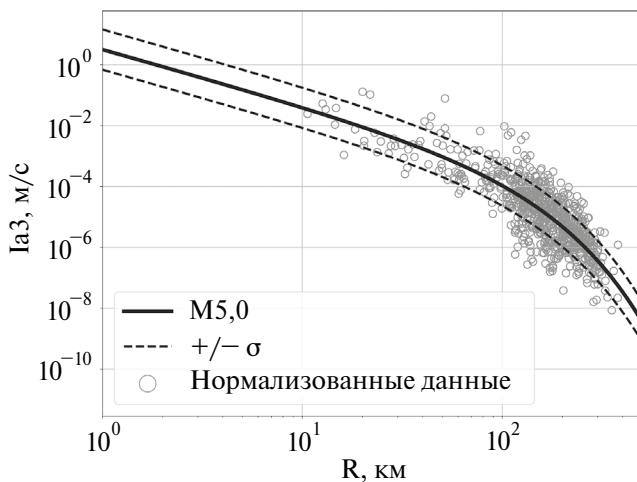


Рис. 3. Нормализованные данные из калибровочной выборки и соответствующая им эмпирическая кривая затухания для Ia3

$\langle V_{S30} \rangle$, м/с	787
$\langle \kappa \rangle$, 1/с	0,038
$\langle \Delta\tau \rangle$, МПа	8,86

Они же являются калибровочными для соответствующей магнитуды. Значение среднего сброшенного напряжения оценено по калибровочной выборке данных согласно формуле (4). Величина сбрасываемого напряжения составила 8,86 МПа. Данная характеристика отождествляется с субисточниками высокочастотного некогерентного излучения – «прочными» пятнами на разрыве [18].

Результаты расчета магнитуды MIa3 и ее сопоставления с Mw представлены на рис. 4. На данном рисунке показаны пары Mw–MIa3. На рис. 5 показана разность магнитуд MIa3 и Mw в зависимости от моментной магнитуды, которая показывает вариации «нулевой» линии в зависимости от эталонной (моментной) магнитуды. Несмотря на статистический разброс, обе магнитуды в среднем близки друг к другу, а найденные различия можно интерпретировать стохастической изменчивостью сброшенного напряжения от события к событию.

На рис. 6 показана еще одна магнитудная зависимость. На данном графике сравниваются предложенная магнитуда (MIa3) и магнитуда Японского метеорологического агентства (Mj). В данном случае Mj оказалась систематически завышена относительно MIa3 на 0,2–0,3 магнитудных единицы для умеренных землетрясений. Для сильнейшего (главного) события MIa3 оказалась несколько выше Mj.

В обоих случаях наблюдается достаточно близкое соответствие магнитудных оценок по шкалам Mw/Mj и MIa3. Пары Mw–MIa3 практически не выходят за пределы $+/-0,5$ относительно линии $Mw = MIa3$. Это означает, что предложенная шкала является эффективной для определения магнитуды землетрясения в диапазоне от $Mw = 3,5$ до $Mw = 5,9$. Также достаточно точно была оценена и магнитуда более крупного события (MIa3 = 7,9), здесь значение находится в разумных пределах относительно моментной магнитуды ($Mw = 7,5$), следовательно, возможна корректная оценка магнитуды и других крупных событий согласно предложенной методике.

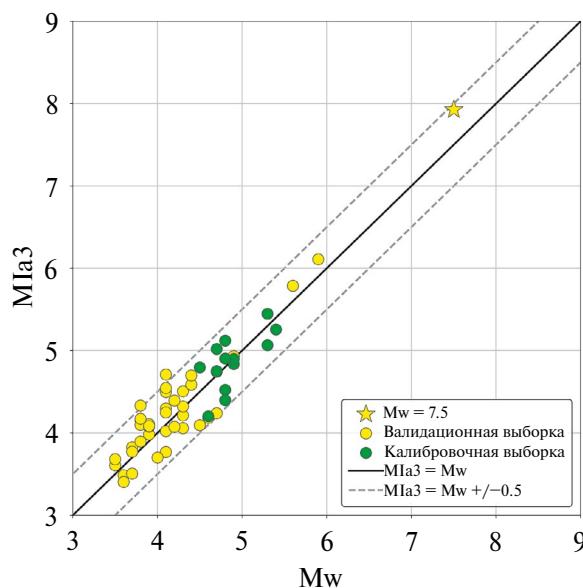


Рис. 4. Сопоставление магнитуд Mw и MIa3

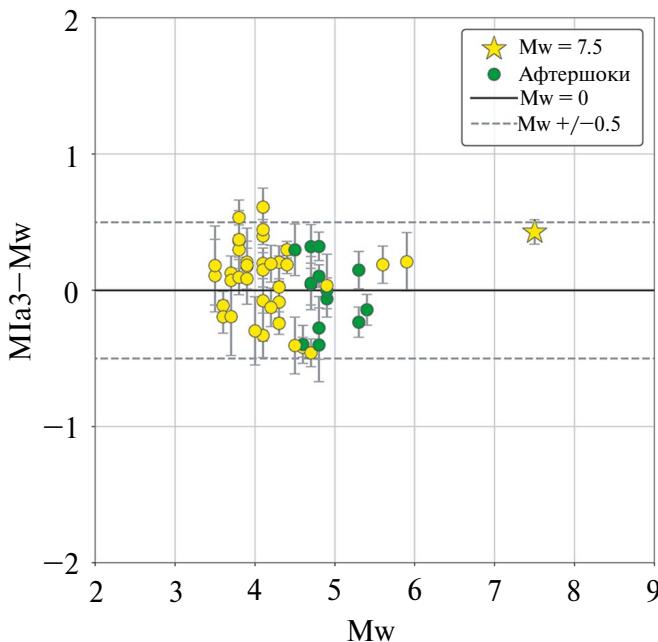


Рис. 5. Разность магнитуд MIa3 и Mw в зависимости от Mw. Светлые кружки относятся к валидационной выборке, темные – к калибровочной

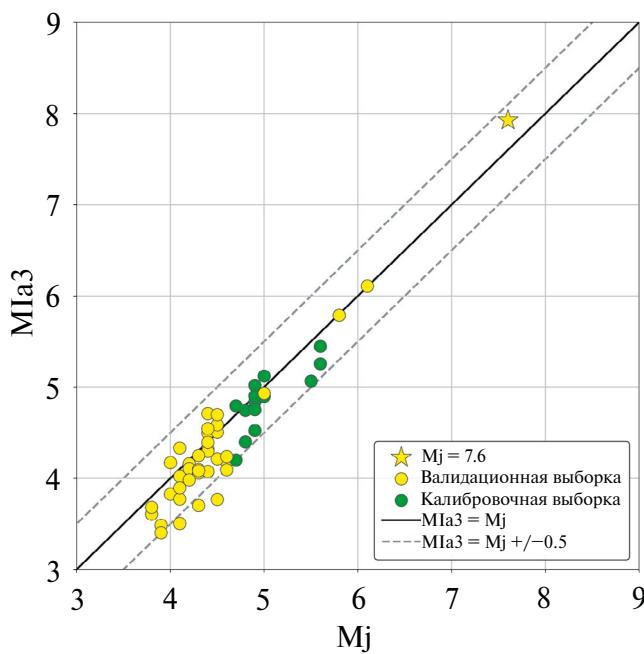


Рис. 6. Сопоставление магнитуд MIa3 и Mj

Результаты тестирования новой магнитудной шкалы по записям главного события ($Mw = 7,5$) показаны на рис. 7. В диапазоне гипоцентральных расстояний 10–100 км доступно всего несколько записей. В этом случае магнитуда M_{IA3} незначительно превышает 8. В диапазоне расстояний 100–300 км значение магнитуды стабилизируется на уровне $M_{IA3} = 7,9$, и при добавлении новых измерений средняя оценка не подвержена вариациям. При пролонгации расстояний до 400 км средняя магнитуда принимает стабильное значение $M_{IA3} = 7,94 \pm 0,122$.

В целом тестирование можно признать успешным. Как и предсказывает теория, высокочастотный спектральный уровень, воспроизведенный с помощью интенсивности Ариаса, следует степенному закону относительно моментной магнитуды [19], а значит, оценка магнитуды крупных землетрясений согласно предложенной методике не будет подвержена систематическим смещениям. Наблюдаемые отклонения M_{IA} от Mw обусловлены, наиболее вероятно, очаговыми процессами, генерирующими высокочастотное излучение.

Предложенная магнитуда, по-видимому, выглядит перспективной и требует дальнейшей апробации в других сейсмоактивных районах и для разных типов землетрясений.

Заключение

Апробирована новая энергетическая магнитудная шкала (M_{IA3}) по измерениям параметров сильных движений грунта в диапазоне расстояний 10–400 км. В качестве амплитудной метрики используется модифицированная интенсивность Ариаса. Магнитуда калибруется по средним и умеренным землетрясениям в целевом регионе ($M \sim 5$).

Эффективность определения магнитуды землетрясения по предложенной методике показана на примере записей крупного землетрясения в Японии ($Mw = 7,5$, 01.01.2024 г.) и его афтершоков. Результаты исследований показали, что определяемая по новой методике магнитуда близка к значениям моментной магнитуды.

С учетом относительно небольшой продолжительности высокочастотных колебаний сильных землетрясений и с используемым диапазоном гипоцентральных расстояний время на оценку магнитуды не превышает три минуты. Поэтому новая магнитудная шкала имеет высокий потенциал практического применения в системах раннего предупреждения, а также для прогноза цунамигенности подводного землетрясения.

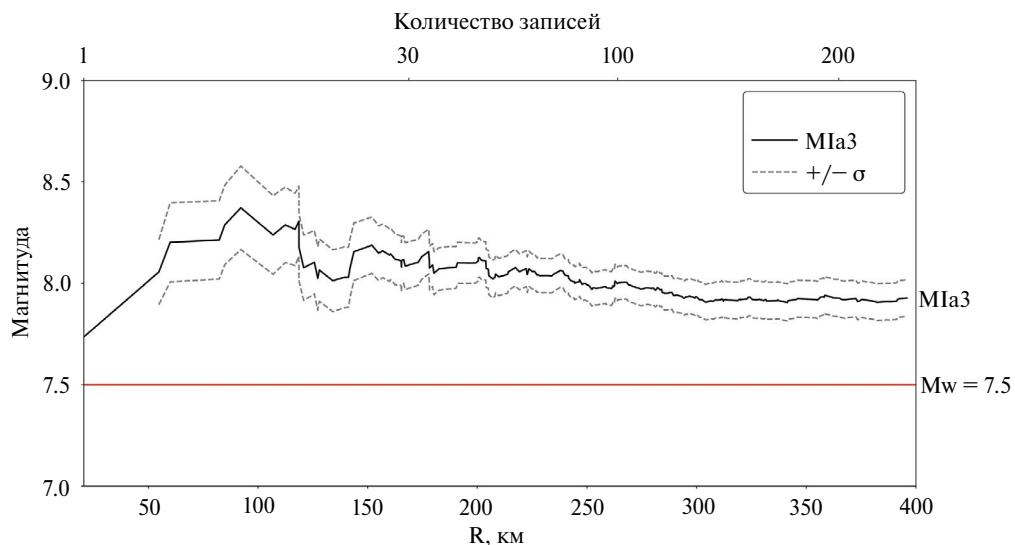


Рис. 7. Зависимость средней оценки M_{IA3} от количества измерений для валидационного землетрясения 01.01.2024 г. в Японии ($Mw = 7,5$)

СПИСОК ИСТОЧНИКОВ

1. Kanamori H. The energy release in great earthquakes // *J. Geophys. Res.* 1977. Vol. 82, No. 20. P. 2981–2987.
2. Oth A., Miyake H., Bindi D. On the relation of earthquake stress drop and ground motion variability // *J. Geophys. Res. Solid Earth.* 2017. Vol. 122, No. 7. P. 5474–5492. <https://doi.org/10.1002/2017JB014026>
3. Picozzi M., Bindi D., Spallarossa D., Oth A., Di Giacomo D., Zollo A. Moment and energy magnitudes: diversity of views on earthquake shaking potential and earthquake statistics // *Geophys. J. Intern.* 2019. No. 2. P. 1245–1259. <https://doi.org/10.1093/gji/ggy488>
4. Bindi D., Zaccarelli R., Strollo A., Di Giacomo D., Heinloo A., Evans P., Cotton F., Tilmann F. Enriching the GEOFON seismic catalog with automatic energy magnitude estimations // *Earth Syst. Sci. Data.* 2024. Vol. 16, No. 4. P. 1733–1745. <https://doi.org/10.5194/essd-16-1733-2024>
5. Parolai S., Spallarossa D., Oth A. et al. A Proposal for a High Frequency Earthquake Magnitude (m3Hz) for Seismic Hazard and Rapid Damage Assessment // *Seismol. Res. Lett.* 2024. Vol. 96, No. 3. P. 1665–1674. <https://doi.org/10.1785/0220240226>
6. Ottemöller L., Havskov J. Moment Magnitude Determination for Local and Regional Earthquakes Based on Source Spectra // *Bull. Seismol. Soc. Am.* 2003. Vol. 93, No. 1. P. 203–214. <https://doi.org/10.1785/0120010220>
7. Hanks T.C., Johnston A.C. Common features of the excitation and propagation of strong ground motion for North American earthquakes // *Bull. Seismol. Soc. Am.* 1992. Vol. 82, No. 1. P. 1–23. <https://doi.org/10.1785/BSSA0820010001>
8. Konovalov A., Orlin I., Stepnov A., Stepnova Yu. Physically Based and Empirical Ground Motion Prediction Equations for Multiple Intensity Measures (PGA, PGV, Ia, FIV3, CII, and Maximum Fourier Acceleration Spectra) on Sakhalin Island // *Geosciences.* 2023. Vol. 13, No. 7. 201. <https://doi.org/10.3390/geosciences13070201>
9. Xu B., Rathje E.M., Hashash Y.M.A., Stewart J.P., Campbell K.W., Silva W.J. κ_0 for soil sites: Observations from KiK-net sites and their use in constraining small-strain damping profiles for site response analysis // *Earthq. Spectra.* 2020. Vol. 36. P. 111–137. <https://doi.org/10.1177/8755293019878188>
10. National Earthquake Information Center of United States Geological Survey. URL: <https://earthquake.usgs.gov> (date of access: 04.06.2025).
11. NIED. F-net. URL: <https://www.fnet.bosai.go.jp> (date of access: 04.06.2025).
12. AIST. Active fault database of Japan. URL: https://gbank.gsj.jp/activefault/cgi/segment_param_e?SearchTYPE=&fval_type1=329-04&segment_id=329-04&topic_list=2&search_mode=2 (date of access: 04.06.2025).
13. Yoshida K., Takagi R., Fukushima Y., Ando R., Ohta Yu., Hiramatsu Y. Role of a hidden fault in the early process of the 2024 Mw 7.5 Noto Peninsula earthquake // *Geophysical Research Letters.* 2024. Vol. 51. e2024GL110993. <https://doi.org/10.1029/2024GL110993>
14. M 7.5 – 2024 Noto Peninsula, Japan Earthquake. Finite Fault // National Earthquake Information Center of United States Geological Survey. URL: <https://earthquake.usgs.gov/earthquakes/eventpage/us6000m0xl/finite-fault> (date of access: 04.06.2025).
15. Nakajima J. Crustal structure beneath earthquake swarm in the Noto peninsula, Japan // *Earth, Planets and Space.* 2022. Vol. 74. 160. <https://doi.org/10.1186/s40623-022-01719-x>
16. M 7.5 – 2024 Noto Peninsula, Japan Earthquake. Interactive Map // National Earthquake Information Center of United States Geological Survey. URL: <https://earthquake.usgs.gov/earthquakes/eventpage/us6000m0xl/map> (date of access: 04.06.2025).
17. NIED K-NET, KiK-net / National Research Institute for Earth Science and Disaster Resilience. 2019. URL: <https://www.kyoshin.bosai.go.jp> (date of access: 04.06.2025). <https://doi.org/10.17598/NIED.0004>
18. Гусев А.А., Гусева Е.М., Павлов В.М. Моделирование движения грунта при Петропавловском землетрясении 24.11.1971 (M = 7,6) // *Физика Земли.* 2009. № 5. С. 29–38.
19. Irikura K., Miyake H. Recipe for predicting strong ground motion from crustal earthquake scenarios // *Pure Appl. Geophys.* 2011. Vol. 168, No. 1/2. P. 85–104. <https://doi.org/10.1007/s00024-010-0150-9>

REFERENCES

1. Kanamori H. The energy release in great earthquakes. *J. Geophys. Res.* 1977;82(20):2981–2987.
2. Oth A., Miyake H., Bindi D. On the relation of earthquake stress drop and ground motion variability. *J. Geophys. Res. Solid Earth.* 2017;122(7):5474–5492. <https://doi.org/10.1002/2017JB014026>
3. Picozzi M., Bindi D., Spallarossa D., Oth A., Di Giacomo D., Zollo A. Moment and energy magnitudes: diversity of views on earthquake shaking potential and earthquake statistics. *Geophys. J. Intern.* 2019;(2):1245–1259. <https://doi.org/10.1093/gji/ggy488>
4. Bindi D., Zaccarelli R., Strollo A., Di Giacomo D., Heinloo A., Evans P., Cotton F., Tilmann F. Enriching the GEOFON seismic catalog with automatic energy magnitude estimations. *Earth Syst. Sci. Data.* 2024;16(4):1733–1745. <https://doi.org/10.5194/essd-16-1733-2024>
5. Parolai S., Spallarossa D., Oth A. et al. A Proposal for a High Frequency Earthquake Magnitude (m3Hz) for Seismic Hazard and Rapid Damage Assessment. *Seismol. Res. Lett.* 2024;96(3):1665–1674. <https://doi.org/10.1785/0220240226>
6. Ottemöller L., Havskov J. Moment Magnitude Determination for Local and Regional Earthquakes Based on Source Spectra. *Bull. Seismol. Soc. Am.* 2003;93(1):203–214. <https://doi.org/10.1785/0120010220>
7. Hanks T.C., Johnston A.C. Common features of the excitation and propagation of strong ground motion for North American earthquakes. *Bull. Seismol. Soc. Am.* 1992;82(1):1–23. <https://doi.org/10.1785/BSSA0820010001>
8. Konovalov A., Orlin I., Stepnov A., Stepnova Y. Physically Based and Empirical Ground Motion Prediction Equations for Multiple Intensity Measures (PGA, PGV, Ia, FIV3, CII, and Maximum Fourier Acceleration Spectra) on Sakhalin Island. *Geosciences.* 2023;13(7):201. <https://doi.org/10.3390/geosciences13070201>
9. Xu B., Rathje E.M., Hashash Y.M.A., Stewart J.P., Campbell K.W., Silva W.J. κ_0 for soil sites: Observations from KiK-net sites and their use in constraining small-strain damping profiles for site response analysis. *Earthq. Spectra.* 2020;36:111–137. <https://doi.org/10.1177/8755293019878188>
10. National Earthquake Information Center of United States Geological Survey. URL: <https://earthquake.usgs.gov> (date of access: 04.06.2025).
11. NIED. F-net. URL: <https://www.fnet.bosai.go.jp> (date of access: 04.06.2025).
12. AIST. Active fault database of Japan. URL: https://gbank.gsj.jp/activefault/cgi/segment_param_e?SearchTYPE=&fval_type1=329-04&segment_id=329-04&topic_list=2&search_mode=2 (date of access: 04.06.2025).
13. Yoshida K., Takagi R., Fukushima Y., Ando R., Ohta Yu., Hiramatsu Y. Role of a hidden fault in the early process of the 2024 Mw 7.5 Noto Peninsula earthquake. *Geophysical Research Letters.* 2024;51:e2024GL110993. <https://doi.org/10.1029/2024GL110993>
14. M 7.5 – 2024 Noto Peninsula, Japan Earthquake. Finite Fault // National Earthquake Information Center of United States Geological Survey. URL: <https://earthquake.usgs.gov/earthquakes/eventpage/us6000m0xl/finite-fault> (date of access: 04.06.2025).
15. Nakajima J. Crustal structure beneath earthquake swarm in the Noto peninsula, Japan. *Earth Planets Space.* 2022;74:160. <https://doi.org/10.1186/s40623-022-01719-x>
16. M 7.5 – 2024 Noto Peninsula, Japan Earthquake. Interactive Map // National Earthquake Information Center of United States Geological Survey. URL: <https://earthquake.usgs.gov/earthquakes/eventpage/us6000m0xl/map> (date of access: 04.06.2025).
17. NIED K-NET, KiK-net / National Research Institute for Earth Science and Disaster Resilience. 2010. URL: <https://www.kyoshin.bosai.go.jp> (date of access: 04.06.2025). <https://doi.org/10.17598/NIED.0004>
18. Gusev A.A., Guseva E.M., Pavlov V.M. Modeling of the ground motion for the Petropavlovsk earthquake of November 24, 1971 ($M = 7.6$). *Fizika Zemli.* 2009;(5):29–38. (In Russ.).
19. Irikura K., Miyake H. Recipe for predicting strong ground motion from crustal earthquake scenarios. *Pure Appl. Geophys.* 2011;168(1/2):85–104. <https://doi.org/10.1007/s00024-010-0150-9>

НАУКИ О ЗЕМЛЕ
И ОКРУЖАЮЩЕЙ СРЕДЕ

Научная статья

УДК 666.199

DOI: 10.7868/S3034530825050093

**Способ получения композиционного
материала на основе базальта для его
применения в художественной сфере**

А.Е. Диденко[✉], В.В. Андреев, А.А. Чащин, А.А. Карабцов,
М.А. Ушкова, О.О. Шичалин, А.А. Белов, Э.С. Колодезников

Арсений Евгеньевич Диденко
инженер-исследователь
Дальневосточный геологический институт ДВО РАН, Владивосток, Россия
didenko.ae@dvfu.ru
<https://orcid.org/0009-0001-8616-8191>

Вадим Вячеславович Андреев
кандидат технических наук, доцент
Дальневосточный федеральный университет, Владивосток, Россия
andreev.vv@dvfu.ru
<https://orcid.org/0000-0001-9798-2028>

Александр Адольфович Чащин
кандидат геолого-минералогических наук, старший научный сотрудник
Дальневосточный геологический институт ДВО РАН, Владивосток, Россия
achashchin@mail.ru
<https://orcid.org/0000-0002-6169-6748>

Александр Александрович Карабцов
кандидат геолого-минералогических наук, ведущий научный сотрудник
Дальневосточный геологический институт ДВО РАН, Владивосток, Россия
karabzov@fegi.ru

Мария Александровна Ушкова
ведущий инженер
Дальневосточный геологический институт ДВО РАН, Владивосток, Россия
m_ushkova@list.ru
<https://orcid.org/0009-0001-3981-7099>

Олег Олегович Шичалин
кандидат химических наук, научный сотрудник
Дальневосточный федеральный университет, Владивосток, Россия
shichalin_oo@dvfu.ru
<https://orcid.org/0000-0002-2441-6209>

Антон Алексеевич Белов

кандидат химических наук, научный сотрудник

Дальневосточный федеральный университет, Владивосток, Россия

belov_aa@dvfu.ru

<https://orcid.org/0000-0003-3120-819X>

Эрхан Сергеевич Колодезников

лаборант-исследователь

Дальневосточный федеральный университет, Владивосток, Россия

kolodeznikov.es@dvfu.ru

<https://orcid.org/0009-0001-8150-036X>

Аннотация. Разработан способ получения композиционного материала на основе базальта с медным наполнителем методом искрового плазменного спекания. Установлено, что образец, спеченный при 1080 °С и давлении 3,8 кН, обладает кристаллической структурой с равномерным распределением меди, высокой плотностью и отражательной способностью, что делает его перспективным для художественных применений. В отличие от него образец, полученный при 1300 °С без давления, имеет аморфную структуру и повышенную пористость. Результаты исследования имеют перспективы применения данного материала в художественной сфере, включая создание мозаики, декоративных панелей, а также использование в ювелирном деле.

Ключевые слова: композиционный материал, базальт, композит на основе базальта

Для цитирования: Диденко А.Е., Андреев В.В., Чащин А.А., Карабцов А.А., Ушкова М.А., Шичалин О.О., Белов А.А., Колодезников Э.С. Способ получения композиционного материала на основе базальта для его применения в художественной сфере // Вестн. ДВО РАН. 2025. № 5. С. 116–125. <http://dx.doi.org/10.7868/S3034530825050093>

Финансирование. Работа выполнена в рамках государственного задания Минобрнауки России для ДВГИ ДВО РАН.

Original article

Method of obtaining composite material based on basalt for its use in the art field

A.E. Didenko, V.V. Andreev, A.A. Chashchin, A.A. Karabtsov,
M.A. Ushkova, O.O. Shichalin, A.A. Belov, E.S. Kolodeznikov

Arseniy E. Didenko

Research Engineer

Far East Geological Institute, FEB RAS, Vladivostok, Russia

didenko.ae@dvfu.ru

<https://orcid.org/0009-0001-8616-8191>

Vadim V. Andreev

Candidate of Sciences in Technique, Associate Professor

Far East Federal University, Vladivostok, Russia

andreev.vv@dvfu.ru

<https://orcid.org/0000-0001-9798-2028>

Alexander A. Chashchin

Candidate of Sciences in Geology and Mineralogy, Senior Researcher

Far East Geological Institute, FEB RAS, Vladivostok, Russia

achashchin@mail.ru

<https://orcid.org/0000-0002-6169-6748>

Alexander A. Karabtsov

Candidate of Sciences in Geology and Mineralogy, Leading Researcher
Far East Geological Institute, FEB RAS, Vladivostok, Russia
karabzov@fegi.ru

Maria A. Ushkova

Leading Engineer
Far East Geological Institute, FEB RAS, Vladivostok, Russia
m_ushkova@list.ru
<https://orcid.org/0009-0001-3981-7099>

Oleg O. Shichalin

Candidate of Sciences in Chemistry, Researcher
Far East Federal University, Vladivostok, Russia
shichalin_oo@dvfu.ru
<https://orcid.org/0000-0002-2441-6209>

Anton A. Belov

Candidate of Sciences in Chemistry, Researcher
Far East Federal University, Vladivostok, Russia
belov_aa@dvfu.ru
<https://orcid.org/0000-0003-3120-819X>

Erkhan S. Kolodeznikov

Laboratory Research Assistant
Far East Federal University, Vladivostok, Russia
kolodeznikov.es@dvfu.ru
<https://orcid.org/0009-0001-8150-036X>

Abstract. A method for obtaining a composite material based on basalt with a copper filler by spark plasma sintering has been developed. It was found that the sample sintered at 1080 °C and a pressure of 3,8 kN has a crystalline structure with a uniform distribution of copper, high density and reflectivity, which makes it promising for artistic applications. In contrast, the sample obtained at 1300 °C without pressure has an amorphous structure and increased porosity. The research results have prospects for the application of this material in the artistic field, including the creation of mosaics, decorative panels, as well as use in jewelry.

Keywords: composite material, basalt, basalt-based composite

For citation: Didenko A.E., Andreev V.V., Chashchin A.A., Karabtsov A.A., Ushkova M.A., Shichalin O.O., Belov A.A., Kolodeznikov E.S. Method of obtaining composite material based on basalt for its use in the art field. *Vestnik of the FEB RAS*. 2025;(5):116–125. (In Russ.). <http://dx.doi.org/10.7868/S3034530825050093>

Funding. The work was carried out within the framework of the state assignment of the Ministry of Science and Higher Education of the Russian Federation for the Far East Geological Institute, FEB RAS.

Введение

В современном мире прикладного искусства наблюдается постоянный поиск новых материалов и технологий, позволяющих расширить творческие возможности [1]. Особое внимание уделяется разработке композиционных материалов, сочетающих в себе уникальные свойства основного компонента с армирующими добавками [2, 3].

Композиционные материалы на основе базальтового сырья представляют собой новое направление в художественной сфере. Их применение открывает широкие возможности для изготовления уникальных художественных изделий и разработки новых дизайнерских решений. Такие материалы могут использоваться для создания как скульптур, так и декоративных элементов интерьера [4].

Базальт обладает рядом характеристик: высокой прочностью, устойчивостью к механическим воздействиям и долговечностью. Эти свойства делают его перспективным материалом для использования в различных областях, включая художественную индустрию [5, 6].

Актуальность данного направления обусловлена тем, что получение композиционного материала на основе базальта с применением металлов в качестве наполнителя для изготовления художественных изделий не имеет аналогов как в отечественной, так и в зарубежной практике. Дополнительную значимость придает использование местного сырья – базальта из месторождений Приморского края России.

В данной статье описан способ получения композиционного материала на основе базальта методом искрового плазменного спекания. Этот метод позволяет достичь высокой плотности материала при относительно низких температурах по отношению к температуре плавления.

Перспективы применения данного материала в художественной сфере включают создание мозаики, декоративных панелей, а также использование в ювелирном деле. Внимание уделяется возможности создания текстурированных поверхностей и разнообразных цветовых решений путем добавления пигментов.

Целью данной работы является разработка способа получения композиционного материала на основе базальта методом искрового плазменного спекания для применения его в художественной сфере.

Материалы и методы эксперимента

В качестве основы композиционного материала был использован базальтовый порошок, армирующими добавками выступала медь в виде стружки и пудры. Марка используемой медной стружки – ПМР, размер частиц – 2 мм [7]. Марка медной пудры – ПМС-1, размер частиц – 10–15 мкм.

Месторождение используемого базальта находится в Приморском крае (Шкотовское плато, ручей Горбатый) (рис. 1). Площадь Шкотовского плато около 3,5 тыс. км², больший объем вулканических пород представляют массивные базальтовые и андезитобазальтовые лавы, сложенные плагиоклазом, авгитом, ортопироксеном от гиперстенового до энстатитового состава, рудными минералами, иногда оливином [8].

Базальтовый порошок был получен в два этапа. На первом этапе применялась щековая дробилка Fritsch Pulverisette 1 (Германия), которая позволила получить крупнофракционный материал с размером частиц 5 мм. Дальнейшее измельчение материала проводилось на

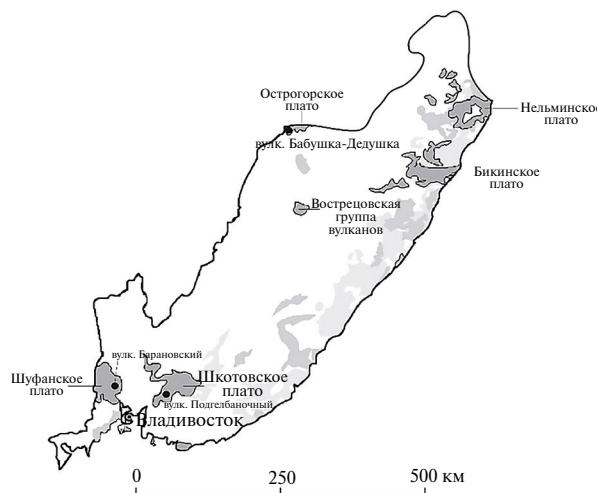


Рис. 1. Схема распространения позднекайнозойских базальтов на территории Приморского края [9]

дисковой мельнице Fritsch Pulverisette 13 (Германия), которая обеспечила получение более мелкодисперсной фракции базальта, средний размер частиц составил 0,5 мм.

Измельченный базальт замешивали с армирующими компонентами в графитовых тиглях, в соотношении 3:1, где три весовые части – базальтовое сырье и одна весовая часть – армирующий материал. Смешивание компонентов осуществлялось ручным способом. Были подготовлены две шихты.

Синтез композита проводился методом искрового плазменного спекания (ИПС) шихты на устройстве SPS-515S (Dr. Sinter LAB TM, Япония). Порошок помещали в графитовые формы (рабочий диаметр 15 и 20 мм), затем заготовку переносили в вакуумную камеру (10^{-5} атм.) и спекали.

Были получены образцы при температурах спекания 1080 и 1300 °С при скорости нагрева 100 °С/мин, при постоянной нагрузке 3,8 кН для первого образца и без давления – для второго. Геометрические размеры полученных образцов цилиндрических матриц композитов: диаметр – 15 мм для образца № 2 и 20 мм для образца № 1; толщина – 10 (образец № 2) и 15 мм (образец № 1). Выбор толщины обусловлен типом графитовой формы (ее диаметром), а также режимом спекания (давлением и температурой).

Химический состав базальта определяли методом рентгенофлуоресцентного анализа с помощью сканирующего спектрометра Bruker S4 Pioneer (Германия). Химический состав базальта (мас. %):

SiO ₂	49,7	CaO	7,94
TiO ₂	2,31	Na ₂ O	3,33
Al ₂ O ₃	16,13	K ₂ O	2,26
Fe ₂ O ₃	4,27	H ₂ O	0,09
FeO	7,05	п.п.п.	0,56
MnO	0,14	Σ	99,69
MgO	5,10		

Фазовый состав исходного базальтового сырья и спеченных образцов определяли методом рентгенофазового анализа на рентгеновском дифрактометре Rigaku Mini Flex II (Япония). Анализ дифрактограмм проводили с помощью программы Rigaku PDXL. Поверхность образца № 1 исследовали методом сканирующей электронной микроскопии (СЭМ) на электронном микроскопе JEOL JSM-6000plus (Япония). Распределение микрочастиц в объеме матрицы композита определяли методом рентгеновской микротомографии с помощью томографа Bruker SkyScan 1272 (Бельгия). Фотографии исследуемых композиционных материалов получены с помощью фотоаппарата Nikon Coolpix 4500 (Япония).

Результаты и обсуждение

Рентгенофазовый анализ исходного базальтового сырья демонстрирует кристаллическую структуру, которая включает плагиоклазы и пироксены. На рис. 2 представлена дифрактограмма исходного базальта. Данные рентгенофазового анализа образца № 1 приведены на рис. 3.

Расшифровка дифрактограммы образца № 1 свидетельствует о том, что кристаллизационные процессы прошли до конца. Данный образец имеет следующий фазовый состав: полевой шпат, авгит и медь, которая является армирующим компонентом.

Дифрактограмма образца № 2 представлена на рис. 4. Данные рентгенофазового анализа образца № 2 показали наличие аморфной фазы, что связано прежде всего со скоростью охлаждения, не способствующей началу процесса кристаллизации.

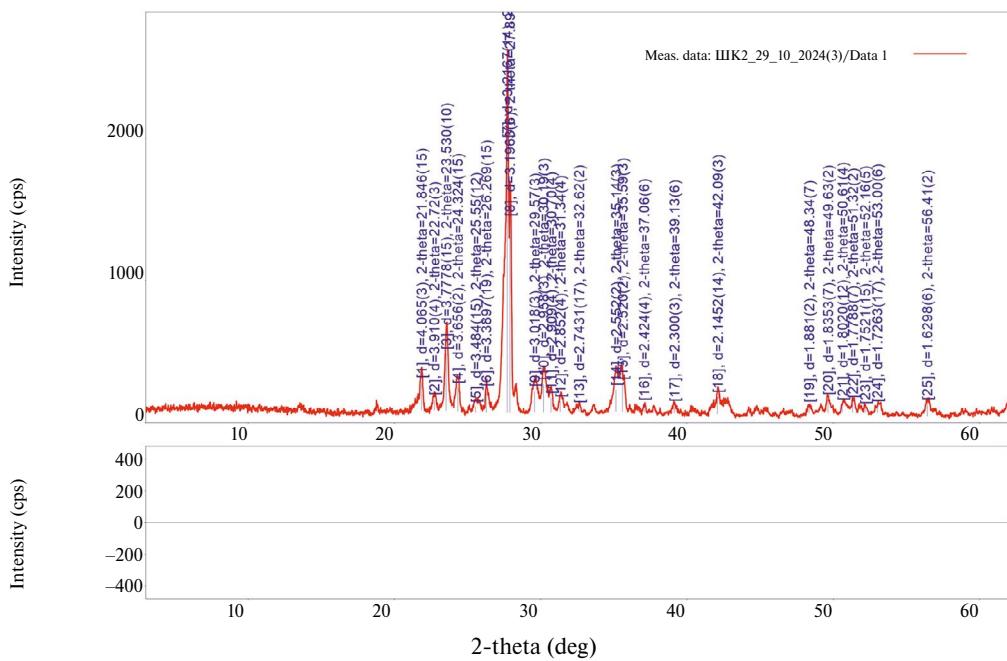


Рис. 2. Дифрактограмма исходного базальтового сырья

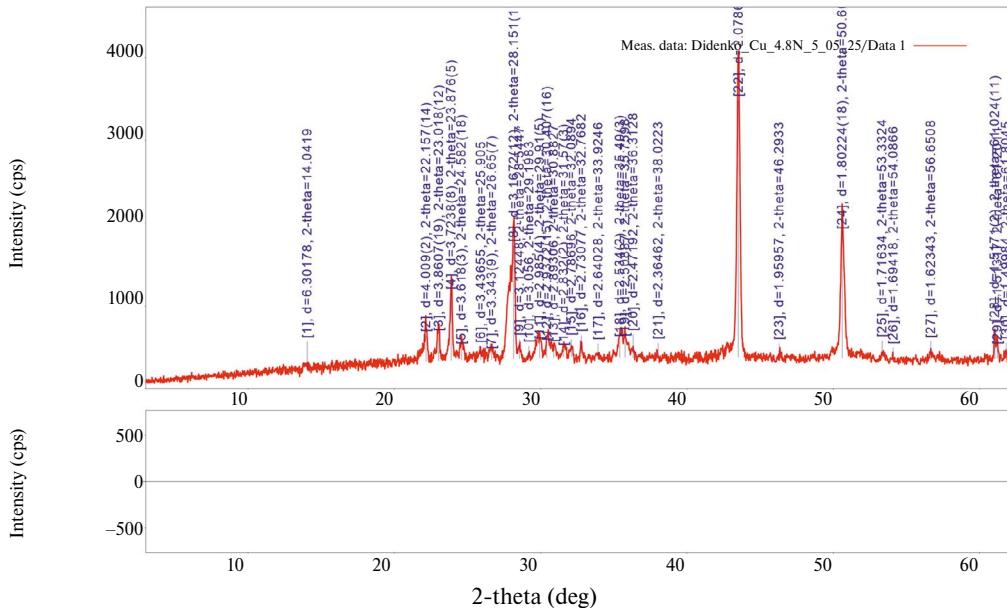


Рис. 3. Дифрактограмма образца № 1

На рис. 5 представлены снимки поверхности образца, полученные методом сканирующей электронной микроскопии (СЭМ) на микроскопе JEOL JSM-6000plus. Анализ снимков показывает равномерное распределение медной пудры по всей поверхности образца, а крупные включения, которые хорошо видны в режиме обратно отраженных электронов (подсвечены белым цветом), являются медной стружкой. Помимо меди в структуре присутствуют кристаллы плагиоклаза и пироксена, что было определено с помощью энерго-

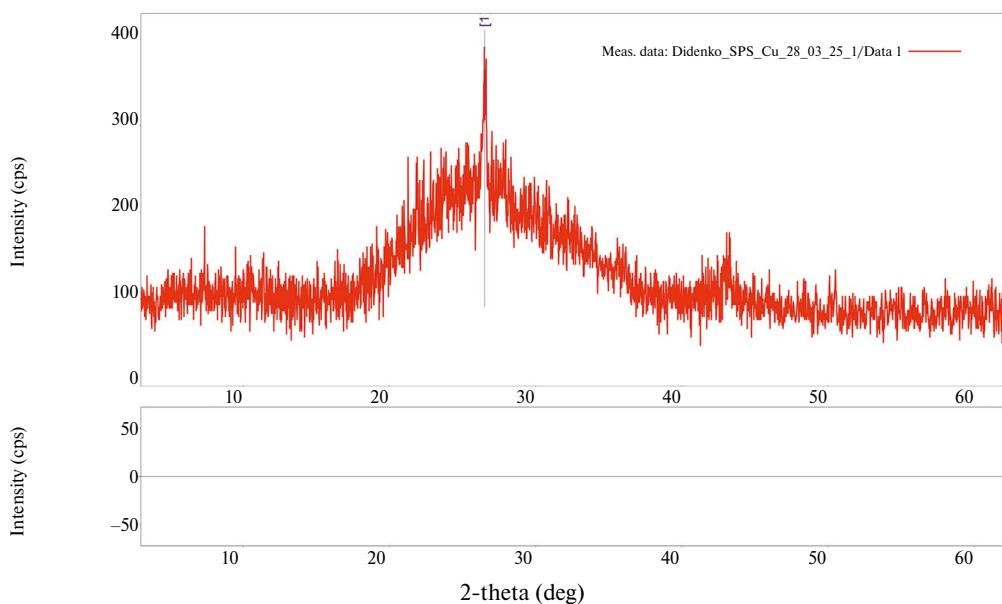


Рис. 4. Дифрактограмма образца № 2

дисперсионной спектроскопии (см. рис. 5, *b*, где точка 001 – плагиоклаз, точка 002 – медь, точки 003, 004 – пироксены).

На томографе Bruker SkyScan 1272 методом рентгеновской микротомографии выявлено распределение частиц в объеме полученных композиционных материалов. На рис. 6 представлены снимки распределения частиц в объеме матриц композитов. Исходя из анализа рентгеновской плотности образца установлено, что светлые включения являются медью.

Образец № 1, спеченный при температуре 1080 °C и давлении 3,8 кН, представлен на рис. 6, *b*. Данный образец имеет явное неравномерное распределение меди в объеме матрицы, основное распределение частиц меди находится в центре образца. На рис. 6, *a* приведен образец № 2, спеченный при температуре 1300 °C, без давления. Томография образца № 2 демонстрирует более равномерное распределение частиц меди по всему объему матрицы композита.

Для оценки эстетических свойств и определения возможности дальнейшего применения полученных композитов в художественной сфере приведены фотографии, представленные на рис. 7.

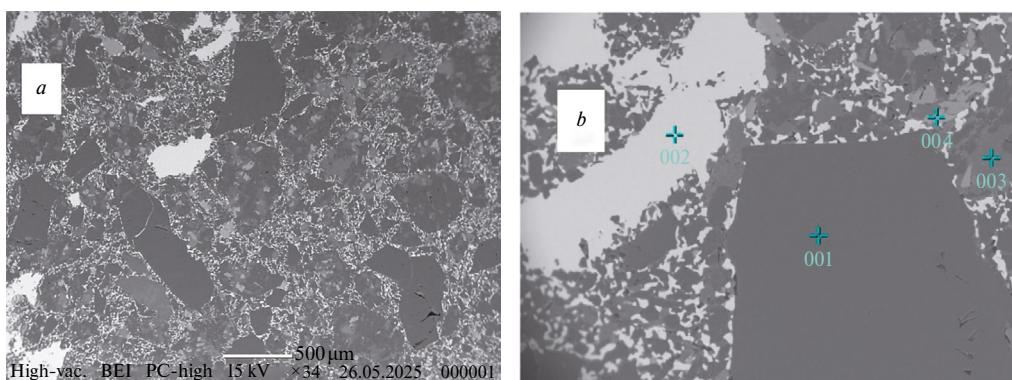


Рис. 5. Снимки (СЭМ) образца № 1: *a* – общая структура, ×34; *b* – фрагмент общей структуры с точками энергодисперсионной спектроскопии, ×200

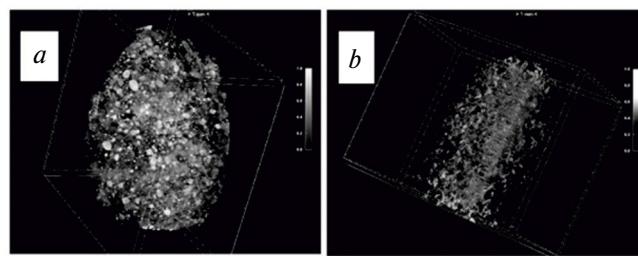


Рис. 6. Снимки (рентгеновская томография) распределения частиц в объеме матриц композитов: *a* – образец № 2; *b* – образец № 1

У образца № 1 матрица черного цвета, но благодаря медной пудре поверхность имеет оранжевый цвет. Поверхность образца обладает хорошей отражательной способностью. Крупные включения меди добавляют переливы, которые хорошо сочетаются с матрицей композита. Образец № 1, спеченный под давлением, имеет гладкую поверхность без пор и отлично поддается шлифовке и полировке.

Как видно на рис. 7 (образец № 2), полученный композит имеет матрицу черного цвета (базальт) с небольшим количеством вкраплений меди. Поверхность данного образца имеет слабую отражательную способность.

Образец № 2 – пористый, из-за чего при эксплуатации данного материала поверхность будет быстро загрязняться. Из-за высокой пористости операции шлифовки и полировки вызывают трудности.

Таким образом, оценка оптико-эстетических свойств получившихся образцов показывает, что наиболее подходящим вариантом является образец, который был спечен под давлением 3,8 кН и температуре 1080 °C.

Выводы

Проведенные исследования позволили разработать способ получения композиционного материала на основе базальта методом искрового плазменного спекания. Установлено, что применение давления 3,8 кН при температуре 1080 °C обеспечивает формирование плотной кристаллической структуры с равномерным распределением медного наполнителя, в то время как спекание при 1300 °C без давления приводит к образованию аморфной пористой структуры. Полученный оптимальным способом материал демонстрирует высокие эстетические характеристики, включая гладкую поверхность и выраженную отражательную способность, что определяет его перспективность для художественного применения. Результаты работы подтверждают возможность эффективного использования базальтового сырья Приморского края для создания функциональных композиционных материалов с заданными свойствами.

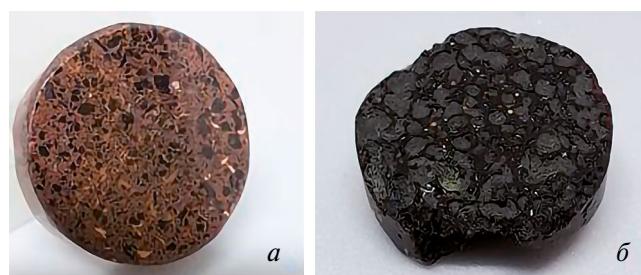


Рис. 7. Полученные композиты: *a* – образец № 1, *б* – образец № 2

Результаты исследований показывают перспективность использования базальта месторождений Приморского края для получения композиционных материалов с возможностью их дальнейшего применения в создании художественных изделий.

В то же время использование местного и практически неограниченного минерального сырья (базальт) способствует развитию региональной промышленности и снижению затрат на производство.

СПИСОК ИСТОЧНИКОВ

1. Зябнева О.А., Иванова С.А. Применение полимерных композитов // Наука и образование в области технической эстетики, дизайна и технологии художественной обработки материалов: материалы XI междунар. науч.-практ. конф. вузов России / СПбГУПТД. СПб.: СПбГУПТД, 2019. С. 315–318.
2. Айдаралиев Ж.К. и др. Разработка технологии получения гипсбазальтовых композитов // Вестник Кыргызско-Российского славянского университета. 2019. Т. 19, № 8. С. 102–105.
3. Пугин К.Г., Иванов Н.К. Применение композиционных материалов на основе базальта в приводных валах транспортно-технологических машин // Известия Тульского государственного университета. Технические науки. 2024. № 7. С. 463–468.
4. Диденко А.Е., Андреев В.В. Художественное применение базальта // Наука, техника, промышленное производство: история, современное состояние, перспективы: материалы региональной науч.-практ. конф. молодых ученых (Владивосток, 16 декабря 2024 – 20 января 2025 г.) / под общ. ред. Р.А. Полькова. Владивосток: Дальневост. федерал. ун-т, 2025. С. 477–480.
5. De Lima L.F., Zorzi J.E., Cruz R.C.D. Basaltic glass-ceramic: A short review // Boletín de la Sociedad Española de Cerámica y Vidrio. 2022. Vol. 61, Iss. 1. P. 2–12. <https://doi.org/10.1016/j.bsecv.2020.07.005>
6. Musgraves J.D., Hu J., Calvez L. Springer Handbook of Glass. Cham: Springer, 2019. <https://doi.org/10.1007/978-3-319-93728-1>
7. Медь в виде стружки 2 мм, марка ПМР, чистота 99% // Особо чистые вещества: Интернет-магазин по розничной продаже веществ, соединений и элементов с высокой чистотой [Электронный ресурс]. URL: <https://ochv.ru/magazin/product/med-v-vide-struzhki-2-mm-marka-pmr-chistota-99> (дата обращения: 05.07.2025).
8. Андреев В.В. Стеклокристаллические покрытия на основе базальтов Приморского края / автореф. дис. ... канд. техн. наук. Владивосток: ДВГТУ, 2002. 24 с.
9. Андреев В.В. и др. Исследование технологии получения стеклокристаллических материалов на основе базальтов Приморского края // Вестник Инженерной школы Дальневосточного федерального университета. 2017. № 3 (32). С. 156–166.

REFERENCES

1. Zyabneva O.A., Ivanova S.A. Application of polymer composites. In: *Science and education in the field of technical aesthetics, design and technology of artistic processing of materials*. Proceedings of the XI International Scientific and Practical Conf. of Russian Universities. Saint Petersburg: Saint Petersburg State University of Industrial Technologies and Design; 2019. P. 315–318. (In Russ.).
2. Aidaraliev J.K. et al. Development of technology for the production of gypsum-basalt composites. *Bulletin of the Kyrgyz-Russian Slavic University*. 2019;19(8):102–105 (In Russ.).
3. Pugin K.G., Ivanov N.K. The use of basalt-based composite materials in the drive shafts of transport and technological machines. *Proceedings of Tula State University. Technical sciences*. 2024;(7):463–468. (In Russ.).
4. Didenko A.E., Andreev V.V. Artistic application of basalt. In: *Science, technology, industrial production: history, current state, prospects*. Materials of regional science-practical conference of young scientists (Vladivostok, December 16, 2024 – January 20, 2025). Vladivostok: FEFU; 2025. P. 477–480. (In Russ.).
5. De Lima L.F., Zorzi J.E., Cruz R.C.D. Basaltic glass-ceramic: A short review. *Boletín de la Sociedad Española de Cerámica y Vidrio*. 2022;61(1):2–12. <https://doi.org/10.1016/j.bsecv.2020.07.005>
6. Musgraves J.D., Hu J., Calvez L. Springer Handbook of Glass. Cham: Springer; 2019. <https://doi.org/10.1007/978-3-319-93728-1>

7. Copper in the form of chips of 2 mm, grade PMR, purity 99% // High Purity Substances: Online retail store for high purity substances, compounds and elements (In Russ.). URL: <https://ochv.ru/magazin/product/med-v-vide-struzhki-2-mm-marka-pmr-chistota-99> (date of access: 05.07.2025).
8. Andreev V.V. Glass crystal coatings based on basalts of Primorsky Krai: abstract of the thesis of the candidate of technical Sciences. Vladivostok: DVG TU; 2002. 24 p. (In Russ.).
9. Andreev V.V. et al. The research in the technology for producing glass-crystalline materials based on basalts of Primorsky Krai. *FEFU: School of Engineering Bulletin*. 2017;32(3):156–166. (In Russ.).

*Подписка на журнал «Вестник Дальневосточного отделения РАН»
принимается с любого номера Агентством подписки
и доставки периодических изданий Урал-Пресс (www.ural-press.ru).
Подписной индекс 70193 в Каталоге периодических изданий «Газеты и журналы»
Урал-Пресс.*

*Полнотекстовые варианты статей можно найти в Интернете:
<http://elibrary.ru/issues.asp?id=2774>, <http://journals.rcsi.science/0869-7698/issue/view/>*

*Ответственные за номер: А.И. Ханчук, И.А. Тарасенко
Над номером работали: В.С. Жердев, Л.А. Русова, Н.С. Мун, Г.А. Веренцова*

Учредители
Федеральное государственное бюджетное
учреждение «Российская академия наук»
119991, г. Москва, Ленинский просп., д. 14
Федеральное государственное бюджетное
учреждение «Дальневосточное отделение
Российской академии наук»
690091, г. Владивосток, ул. Светланская, д. 50

Адрес редакции:
690091, Владивосток, ул. Светланская, 50, к. 51
Тел. +7(423)222-25-88
E-mail: vestdvo@pran.ru, vestnikdvo@hq.febras.ru
<https://vestdvoras.ru>

Издатель
Федеральное государственное бюджетное
учреждение «Российская академия наук»
119991, Москва, Ленинский просп., д. 14
Исполнитель по контракту № 4У-ЕП-020-2-25
от 11.03.2025 ФГБУ «Издательство «Наука»
121099, г. Москва, Шубинский пер., д. 6, стр. 1
Отпечатано в ФГБУ «Издательство «Наука»
121099, г. Москва, Шубинский пер., д. 6, стр. 1

Подписано к печати
Дата выхода в свет
Формат 70 × 108 1/16
Усл. печ. л.
Уч.-изд. л.
Тираж экз.
Заказ
Цена свободная

Свидетельство Роскомнадзора о регистрации ПИ № ФС 77-75560 от 12.04.2019 г.