



Vestnik of Geosciences **Вестник геонаук**

Август
August
2021,
№ 8 (320)

Главный редактор

А. М. Асхабов

Chief Editor

A. M. Askhabov

Редакционный совет

А. И. Антошкина, Сыктывкар, Россия
М. А. Т. М. Брокманс, Тронхейм, Норвегия
И. Н. Бурцев, Сыктывкар, Россия
Д. А. Бушнев, Сыктывкар, Россия
Ю. Л. Войтеховский, Санкт-Петербург, Россия
А. Д. Гвишиани, Москва, Россия
И. В. Козырева, Сыктывкар, Россия
М. Комак, Любляна, Словения
В. А. Коротеев, Екатеринбург, Россия
О. Б. Котова, Сыктывкар, Россия
С. В. Кривовичев, Санкт-Петербург, Россия
С. К. Кузнецов, Сыктывкар, Россия
М. Мартинс, Ору-Прету, Бразилия
Т. П. Майорова, Сыктывкар, Россия
Ж. К. Мелгарехо, Барселона, Испания
Ф. Мон, Пекин, Китай
П. Мянник, Таллин, Эстония
А. М. Пыстин, Сыктывкар, Россия
К. М. Соджа, Гамильтон, Нью-Йорк, США
О. В. Удоратина, Сыктывкар, Россия
М. А. Федонкин, Москва, Россия

Editorial Board

Anna I. Antoshkina, Syktyvkar, Russia
Maarten A.T.M. Broekmans, Trondheim, Norway
Igor N. Burtsev, Syktyvkar, Russia
Dmitry A. Bushnev, Syktyvkar, Russia
Yury L. Voytekhsy, Saint Petersburg, Russia
Alexey D. Gvishiani, Moscow, Russia
Irina V. Kozyreva, Syktyvkar, Russia
Marko Komac, Ljubljana, Slovenia
Viktor A. Koroteev, Ekaterinburg, Russia
Olga. B. Kotova, Syktyvkar, Russia
Sergey V. Krivovichev, Saint Petersburg, Russia
Sergey K. Kuznetsov, Syktyvkar, Russia
Maximiliano de Souza Martins, Ouro Preto, Brazil
Tatyana P. Mayorova, Syktyvkar, Russia
Joan Carles Melgarejo, Barcelona, Spain
Fancong Meng, Beijing, China
Peep Männik, Tallinn, Estonia
Alexander M. Pystin, Syktyvkar, Russia
Constance M. Soja, Hamilton, NY, USA
Oksana V. Udoratina, Syktyvkar, Russia
Mikhail A. Fedonkin, Moscow, Russia

Редакционная коллегия

А. И. Антошкина, Т. М. Безносова (ответственный секретарь), И. Н. Бурцев, Д. А. Бушнев, И. В. Козырева, О. Б. Котова (заместитель главного редактора), С. К. Кузнецов, Т. П. Майорова, А. М. Пыстин, О. В. Удоратина

Editorial team

A. I. Antoshkina, T. M. Beznosova (Executive Secretary), I. N. Burtsev, D. A. Bushnev, I. V. Kozyreva, O. B. Kotova (Deputy Chief Editor), S. K. Kuznetsov, T. P. Mayorova, A. M. Pystin, O. V. Udoratina

Технический редактор

Г. Н. Каблис

Technical Editor

G. N. Kablis

Заведующий редакцией

Т. А. Некучаева

Managing Editor

T. A. Nekuchaeva

НАУЧНЫЙ ЖУРНАЛ

Выходит ежемесячно. Основан в 1995 году академиком Н. П. Юшкиным.

Предыдущее название:

Вестник Института геологии Коми НЦ УрО РАН

Пятилетний импакт-фактор
РИНЦ журнала (2020) – 0,532



SCIENTIFIC JOURNAL

Monthly issued. Founded in 1995 by Academician N. P. Yushkin.

Former title:

Vestnik of Institute of Geology of Komi SC UB RAS

Five-year RSCI
impact factor (2020) – 0.532

geo.komisc.ru/vestnik

Содержание**Content**

Научные статьи	Scientific articles
Типоморфизм хромшпинелидов из голоценовых псефитов Кыввожского золотороссыпного поля (Вольско-Вымская гряда, Средний Тиман) <i>Ю. В. Глухов, Б. А. Макеев, М. Ю. Сокерин</i>3	Typomorphism of chromespinelides from the Holocene psephites of the Kyvvozhskoye gold-placer field (Volsko-Vymskaya ridge, Middle Timan) <i>Yu. V. Glukhov, B. A. Makeev, M. Yu. Sokerin</i>3
Нано- и микроморфологические доказательства коллоидной структуры содержимого включений кольцевых силикатных кристаллов <i>Н. Н. Пискунова, А. А. Кряжев</i> 16	Nano- and micromorphological evidences of the colloidal structure of ring silicate crystal inclusions <i>N. N. Piskunova, A. A. Kryazhev</i> 16
Промышленные воды Хорейверской впадины Печорской плиты <i>Т. П. Митюшева, О. Е. Амосова</i>27	Industrial brines of the Khoreyver depression of the Pechora plate <i>T. P. Mityusheva, O. Ye. Amosova</i>27
Амфиболы высокобарических метабазитов района Слюдяной горки (Полярный Урал, хребет Марун-Кей) из коллекции Геологического музея им. А. А. Чернова <i>И. С. Астахова, К. С. Попвасев</i>46	Amphiboles of high-pressure metabasites of the Mica hill region (Polar Urals, Marun-Keu range) from the collection of A. A. Chernov Geological museum <i>I. S. Astakhova, K. S. Popvasev</i>46
Хроника, события, факты. История науки	Chronicle, events, facts. History of Science
Экскурсия «Малое геологическое кольцо Республики Коми»55	«Small geological ring of the Komi Republic» field trip.....55

Правила
оформления
статей



Vestnik
article
Formatting



Типоморфизм хромшпинелидов из голоценовых псефитов Кыввожского золотороссыпного поля (Вольско-Вымская гряда, Средний Тиман)

Ю. В. Глухов, Б. А. Макеев, М. Ю. Сокерин

Институт геологии ФИЦ Коми НЦ УрО РАН, Сыктывкар
glukhov@geo.komisc.ru

Приводятся результаты изучения акцессорных хромшпинелидов из шлиховых проб золотоносных псефитов Кыввожского золотороссыпного поля (Вольско-Вымская гряда, Средний Тиман). В результате изучения типохимизма хромшпинелидов обоснована их генетическая связь с породами преимущественно щелочно-ультраосновного состава — аналогами тиманских позднерифейско-вендских ультрамафитов и ранне-среднедевонских альнэитов. Формирование магматических источников хромшпинелидов происходило в широком диапазоне геотектонических обстановок — от пассивных (платформенных) до активных (островодужных зон субдукции), более характерных для основной массы хромшпинелидов. Кристаллизация хромшпинелидов, обнаруженных в качестве микровключений в лерцолитовых пиропсах в тех же самых шлиховых пробах Кыввожской золотоносной площади, увязывается с обстановкой рифтовых зон (спрединга морского дна). Сделано заключение о вероятном местном (внутридолинном) местонахождении основных магматических источников хромшпинелидов. Обнаруженные хромшпинелиды, содержащие микровключения сульфидов никеля и меди, являются, по мнению авторов, индикаторами магматических пород, содержащих минералы платиновой группы.

Ключевые слова: хромшпинелид, Кыввожское золотороссыпное поле, Вольско-Вымская гряда, Средний Тиман.

Typomorphism of chromspinelides from the Holocene psephites of the Kyvvozhskoye gold-placer field (Volsko-Vymskaya ridge, Middle Timan)

Yu. V. Glukhov, B. A. Makeev, M. Yu. Sokerin

Institute of Geology FRC Komi SC UB RAS, Syktyvkar

The results of the study of accessory chrome spinels from heavy mineral concentrates of gold-bearing psephites of the Kyvvozhsky gold-placer field (Volsko-Vymskaya ridge, Middle Timan) are presented. As a result of the study of the typochemistry of chromspinelides, their genetic relationship with rocks of mainly alkaline-ultrabasic composition — analogues of Timanian Late-Riphean-Vendian ultramafites and Early-Middle Devonian alnoites is substantiated. The formation of magmatic sources of chrome spinels occurred in a wide range of geotectonic settings — from passive (platform) to active (island-arc subduction zones), which are more characteristic of the bulk of chrome spinels. The crystallization of chrome spinels, found as microinclusions in lherzolite pyropes in the same shlich samples of the Kyvvozhskaya gold-bearing area, is associated with the conditions of rift zones (spreading of the seabed). We made a conclusion about probable local (intra-valley) position of main magmatic sources of chrome spinels. The revealed chrome spinels, containing microinclusions of nickel and copper sulfides, are considered by the authors as indicators of igneous rocks containing platinum group minerals.

Keywords: chrome spinel, Kyvvozhsky gold-placer field, Volsko-Vymsky ridge, Middle Timan.

Введение

Помимо неизвестного местоположения коренного благороднометалльного оруденения Кыввожского золотороссыпного поля (Вольско-Вымская гряда), есть ещё одна нерешённая задача региональной металлогении. Необходимо выяснить происхождение минералов платиновой группы, которые отмечаются в россыпях Среднего Тимана вместе с золотом. Прогнозирование и поиск магматических тел гипербазитового и базитового состава, с которыми могут быть связаны минералы платиновой группы, — перспективный путь решения этой задачи. Хромшпинелиды, встречающиеся в подобных магматитах, являются типичными ак-

цессорными минералами россыпей Кыввожского района. Кроме того, по мнению ряда авторов [11] хромшпинелиды (в частности, цинксоодержащие) на Среднем Тимане могут быть использованы при шлиховой съёмке как минералы — спутники алмаза.

Как известно, характеристики состава хромшпинелидов являются чувствительными петрогенетическими индикаторами [16, 19, 21], и изучение типохимизма хромшпинелидов позволит приблизиться к разгадке происхождения платины и других ценных минералов в россыпях региона.

В этой связи мы провели минералогическое изучение хромшпинелидов, отобранных из шлиховых проб золото-

Для цитирования: Глухов Ю. В., Макеев Б. А., Сокерин М. Ю. Типоморфизм хромшпинелидов из голоценовых псефитов Кыввожского золотороссыпного поля (Вольско-Вымская гряда, Средний Тиман) // Вестник геонаук. 2021. 8(320). С. 3–15. DOI: 10.19110/geov.2021.8.1.

For citation: Glukhov Yu. V., Makeev B. A., Sokerin M. Yu. Typomorphism of chromspinelides from the Holocene psephites of the Kyvvozhskoye gold-placer field (Volsko-Vymskaya ridge, Middle Timan). Vestnik of Geosciences, 2021, 8(320), pp. 3–15, doi: 10.19110/geov.2021.8.1.

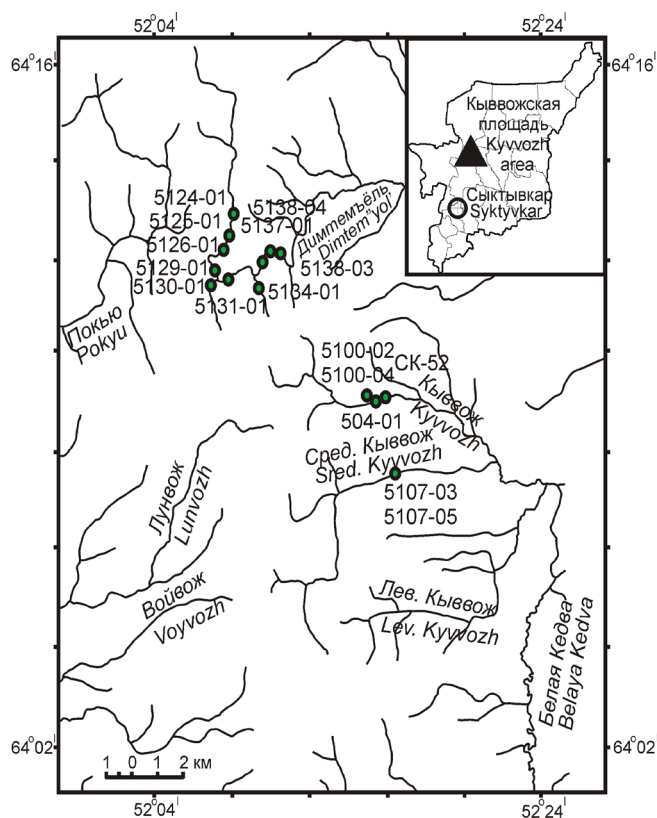


Рис. 1. Район работ и локализация точек пробоотбора
Fig. 1. The study area and localization of sampling points

носных псефитов ряда участков Кыввожского золотороссыпного поля — Димтэмьельского, Кыввожского и Среднекыввожского (рис. 1). Ранее были опубликованы результаты изучения оливина и пиропов из этих же проб [5].

Методы исследования

Исследования проводились на базе ЦКП «Геонаука» Института геологии ФИЦ Коми НЦ УрО РАН. Исходный объём шлиховых проб ~ 0.01 м³. Для получения фотоизображений хромшпинелидов использовался оптический микроскоп Nikon Eclipse LV100ND (цифровая камера DS-L3). Детали микрорельефа поверхности минеральных зёрен, их элементный состав и анатомия изучались при помощи растрового электронного микроскопа Tescan VEGA 3 LMN с энергодисперсионным спектрометром INCA Energy 450 (рабочее напряжение — 20 kV, напыление углеродом).

Результаты исследования

Встречаемость, морфология, гранулометрия. Зёрна хромшпинелидов обычно обнаруживались в концентратах шлиховых проб в количестве десятков знаков на 0.01 м³. Они выделялись своим чёрным, смолистым (иногда бурым) цветом (рис. 2, а, б). Типовая особенность хромшпинелидов — характерные комбинационные многогранники, чаще всего с ясно различимыми формами октаэдра и ромбододекаэдра (рис. 2, с). Встречаются и другие габитусные формы (рис. 2, d).

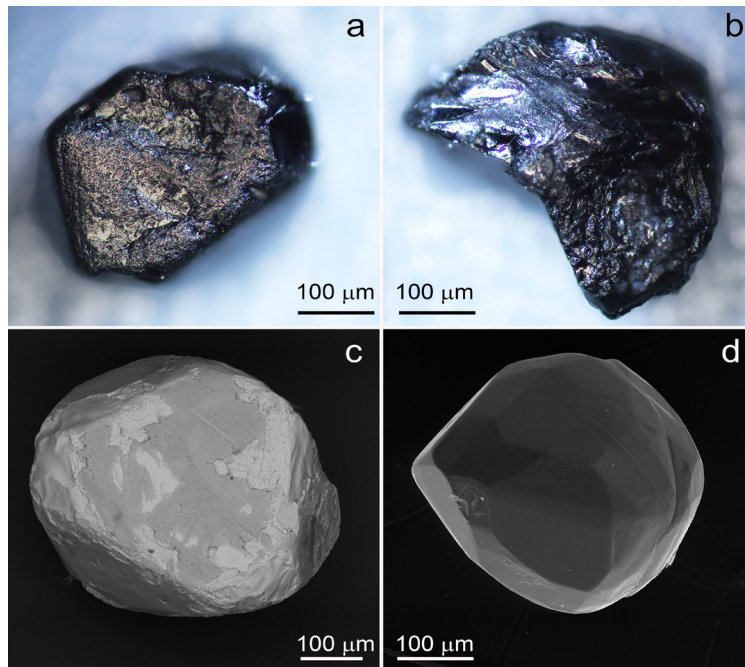


Рис. 2. Хромшпинелиды из голоценовых золотоносных псефитов Кыввожского района: а, с—d — руч. Средний Кыввож: а — индивид с корродированной поверхностью (обр. 5107-05), с — слабоокатанный индивид с фрагментарно сохранившейся магнетитовой оболочкой (обр. 5117-05), d — неокатанный гладкогранный индивид (обр. 5107-3); б — руч. Димтэмьель, оскольчатый индивид (обр. 5130-01). а, б — оптический микроскоп Nikon Eclipse LV100ND; с—d — электронный микроскоп Tescan VEGA 3 LMN, с — обратнорассеянные электроны, d — вторичные электроны

Fig. 2. Chrome spinels from the Holocene gold-bearing psephtes of the Kyvvozh gold field: а, с—d — stream Sredniy Kyvvozh: а — individuals with corrosive surface (sp. 5107-05), с — subrounded individuals with fragmentary magnetitic rim (sp. 5117-05); d — non-rounded smooth-faced individuals (sp. 5107-3); б — stream Dimtem'yol': detrital individuals (spec. 5130-01). а, б — optical microscope Nikon Eclipse LV100ND; с—d — scanning electron microscope Tescan VEGA 3 LMN, с — back-scattered electrons, d — secondary electrons



Помимо эвгедральных угловатых индивидов, в изученной коллекции хромшпинелидов попадалось много оскольчатых (около 50 %) индивидов (рис. 2, б). Некоторые зёрна хромшпинелидов имели отчётливый коррозионный рельеф поверхности (рис. 2, а). По размеру зёрна данного минерала варьировались от 0.2 до 0.5 мм и были распределены в гранулометрических классах крупности +0.1—0.25 и +0.25—0.5 мм.

Внутреннее строение (анатомия). Изучение хромшпинелидов при помощи сканирующего электронного микроскопа показывает, что значительная их доля имеет практически однородное строение (распределение атомной плотности) или имеющиеся небольшие различия внутренних и внешних участков малоcontrastны. Вместе с тем встречаются индивиды с явным неоднородным строением, характеризующимся наличием каём (рис. 3, а, б). Атомная плотность каём, как правило, повышенная (светлый тон в режиме обратнорассеянных электронов). Границы каём часто диффузные (рис. 3, б), реже встречаются контрастные (рис. 3, а). Мощность каём варьируется от нескольких единиц до первых десятков микрометров. Наличие такого каёмчатого строения иногда видно и при осмотре непрепарированных поверхностей хромшпинелидов под электронным микроскопом. Так, на рис. 2, с видны фрагменты частично сохранившейся на кристаллическом индивиде хромшпинелида оболочки, имеющей иной состав (светлый тон).

Химический состав. По данным микрозондового анализа, хромшпинелиды изученной коллекции Кыввожского золотороссыпного поля с учётом «правила доминирующей составной части» [2] представлены чаще всего хромитами (табл. 1)*. Реже встречаются разновидности, в которых преобладает шпинелевый минал. Покрывающие хромшпинелиды новообразованные оболочки по составу относятся к хромитам с повышенным вкладом магнетитового минала. Каймы, в которых преобладает магнетитовый компонент, крайне редки. Согласно номенклатуре хромшпинелидов, разработанной Н. В. Павловым [16], среди изученных шпинелей имеются следующие разновидности: хромпикотит, субферрихромпикотит, алюмохромит, субферриалюмохромит, хромит, субферрихромит, феррихромит, субалюмоферрихромит, ферриалюмохромит.

Среди малых примесей в хромшпинелидах примерно в половине случаев отмечался титан, содержание которого варьировалось в диапазоне от 0.2 до 4.6 мас. % TiO_2 . Также примерно в четверти всех составов (преимущественно в каймах) содержался цинк — от 0.2 до 1.9 мас. % ZnO . В одном примере было зафиксировано содержание 23.6 мас. % ZnO . Около 10 % точек микроанализа показали наличие примесей марганца (от 0.4 до 1.2 мас. % MnO) и ванадия (от 0.2 до 0.4 мас. % V_2O_3).

Микровключения. Внутри зёрен хромшпинелидов обнаруживаются разнообразные минеральные включения субмикронного размера (рис. 3, с—f).

В некоторых индивидах (рис. 3, е) отмечались пойкилобласты клинопироксенов хромдиопсидового состава с размерами выделений от первых единиц до нескольких десятков микрометров. Содержание основных компонентов в данных хромдиопсидовых фазах характеризуется заметным разбросом значений (табл. 2), мас. %: SiO_2 — 43—57, Al_2O_3 — 6—13, MgO — 16—24,

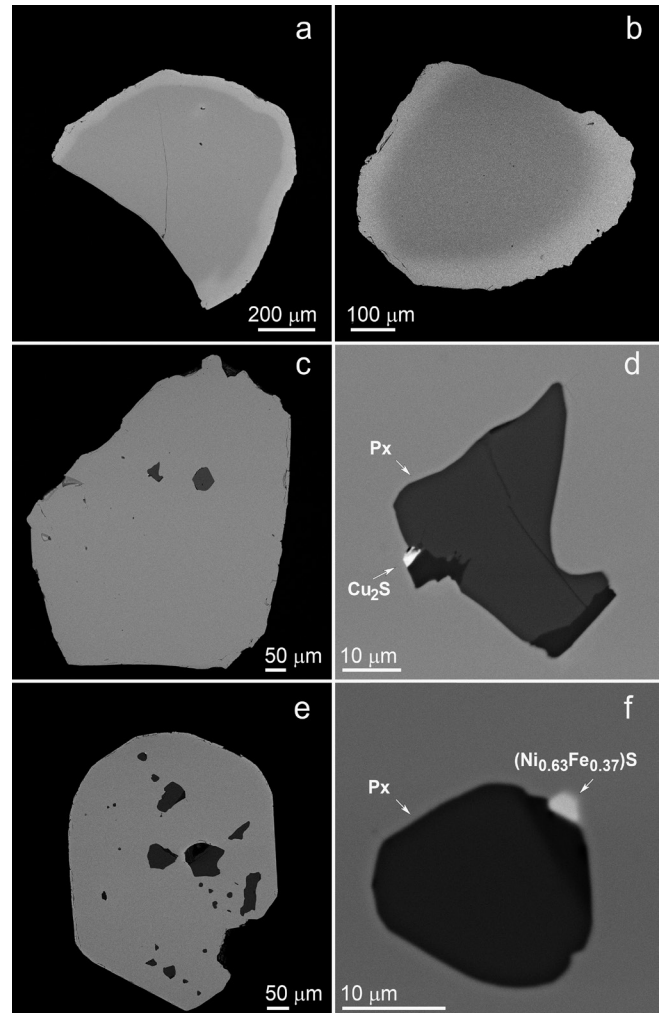


Рис. 3. Внутреннее строение и микроминеральные включения в индивидах хромшпинелидов. а, б — хромшпинелиды с тонкой контрастирующей (а) и широкой диффузной (б) насыщенной магнетитовой компонентой каймой, с—f — хромшпинелиды с включениями. СЭМ Tescan VEGA 3LMN (режим обратнорассеянных электронов). Условные сокращения: Px — пироксены, Cu_2S — фаза халькозинового состава, $(\text{Ni}_{0.63}\text{Fe}_{0.37})\text{S}$ — фаза миллеритового состава. Место отбора образцов: а—d — руч. Димтэмъяль: а — обр. 5130-01, б — обр. 5138-03, с—d — обр. 5138-04; е—f — руч. Средний Кыввож, обр. 5107-05

Fig. 3. Internal structure and micromineral inclusions of chrome spinel individuals. а, б — chrome spinels with thin contrasting (а) and diffusive (b) rim, abounding of magnetite component, с—f — chrome spinels with minerals inclusions. SEM Tescan VEGA 3LMN (mode back-scattered electrons). Abbreviations: Px — pyroxene, Cu_2S — phase with chalcocite composition, $(\text{Ni}_{0.63}\text{Fe}_{0.37})\text{S}$ — phase of millerite (?) composition. Sampling locations: а—d — stream Dintem"yol": а — sp. 5130-01, б — sp. 5138-03, с—d — sp. 5138-04; е—f — stream Sredniy Kyvvoz, sp. 5107-05

* Данная таблица представляет собой сокращённый вариант массива данных микрозондового анализа. В неё помещены составы, наиболее полно характеризующие коллекцию хромшпинелидов из золотоносных псефитов Кыввожской площади.

Таблица 1. Химический состав и формульные коэффициенты хромшпинелидов / **Table 1.** Compound composition and formula coefficients of chromespinels

№ No.	Номер анализа Spectrum No.	Номер образца Sample No.	Компонент, мас. % / Component, wt. %								Сумма Total	Формульные коэффициенты / Formula coefficient									Т. ш. Type
			TiO ₂	Al ₂ O ₃	Cr ₂ O ₃	V ₂ O ₃	FeO	MnO	MgO	ZnO		Ti ⁴⁺	Al ³⁺	Cr ³⁺	V ³⁺	Fe ³⁺	Fe ²⁺	Mn ²⁺	Mg ²⁺	Zn ²⁺	
1	1-1 Ц	CK-52	0.38	10.87	52.68	—	29.07	—	6.71	—	99.71	0.01	0.43	1.40	—	0.16	0.66	—	0.34	—	СФАХ
2	1-2 К	CK-52	0.35	0.76	44.49	—	49.11	0.79	2.76	—	98.26	0.01	0.03	1.28	—	0.67	0.83	0.02	0.15	—	ФХ
3	2-1 Ц	CK-52	0.27	23.22	43.78	0.30	23.51	—	10.27	—	101.35	0.01	0.84	1.07	0.01	0.08	0.53	—	0.47	—	АХ
4	2-2 К	CK-52	0.24	14.52	43.88	0.27	33.96	0.73	4.97	0.46	99.03	0.01	0.58	1.17	0.01	0.24	0.72	0.02	0.25	0.01	СФАХ
5	6-1 Ц	5100-02	—	9.32	57.59	—	25.86	—	7.58	—	100.35	—	0.37	1.53	—	0.10	0.62	—	0.38	—	Х
6	6-2 К	5100-02	0.19	1.72	53.29	—	38.91	0.63	3.98	—	98.72	0.01	0.07	1.52	—	0.40	0.77	0.02	0.21	—	Х
7	7-1 Ц	5100-02	—	8.13	57.02	—	29.11	—	5.72	0.34	100.32	—	0.33	1.54	—	0.13	0.70	—	0.29	0.01	СФХ
8	7-2 К	5100-02	—	—	15.32	—	76.82	—	1.10	—	93.24	—	—	0.47	—	1.53	0.94	—	0.06	—	Мгт
9	9-1 Ц	50401	—	31.57	36.69	—	17.61	—	14.63	0.26	100.76	—	1.08	0.85	—	0.07	0.36	—	0.64	0.01	ХП
10	9-2 К	50401	—	33.09	35.79	—	16.88	—	13.74	0.25	99.75	—	1.15	0.83	—	0.02	0.39	—	0.60	0.01	ХП
11	13-1 Ц	5107-3	0.32	10.20	53.25	—	31.05	—	6.11	0.25	101.18	0.01	0.40	1.41	—	0.18	0.69	—	0.30	0.01	СФХ
12	13-2 К	5107-3	0.31	1.39	47.20	—	45.88	—	2.75	—	97.53	0.01	0.06	1.37	—	0.56	0.85	—	0.15	—	ФХ
13	18-1 Ц	5100-04	—	18.15	43.47	—	29.89	—	8.61	—	100.12	—	0.69	1.10	—	0.21	0.59	—	0.41	—	СФАХ
14	18-3 К	5100-04	—	1.63	40.63	—	49.37	—	1.69	—	93.32	—	0.07	1.24	—	0.69	0.90	—	0.10	—	ФХ
15	20-2 К	5100-04	0.30	16.03	44.11	0.36	31.61	0.95	6.51	0.49	100.36	0.01	0.62	1.14	0.01	0.22	0.64	0.03	0.32	0.01	СФАХ
16	20-3 К	5100-04	—	13.55	45.77	—	32.26	1.15	6.23	0.39	99.35	—	0.53	1.21	—	0.26	0.65	0.03	0.31	0.01	СФАХ
17	22-1 Ц	5107-3	—	6.76	61.68	—	20.48	—	11.31	—	100.23	—	0.26	1.61	—	0.12	0.44	—	0.56	—	Х
18	22-2 К	5107-3	0.22	10.23	61.74	—	19.95	—	11.08	—	99.81	0.01	0.27	1.62	—	0.10	0.45	—	0.55	—	Х
19	24-1 Ц	5107-3	—	14.89	50.52	—	28.15	—	7.72	0.35	101.63	—	0.57	1.29	—	0.14	0.62	—	0.37	0.01	СФАХ
20	24-2 К	5107-3	0.39	2.09	40.08	—	53.26	—	2.56	—	98.38	0.01	0.09	1.15	—	0.75	0.86	—	0.14	—	ФХ
21	27-1 Ц	5107-05	0.25	10.12	54.13	—	28.06	—	7.23	—	99.79	0.01	0.40	1.44	—	0.15	0.64	—	0.36	—	СФХ
22	27-2 К	5107-05	—	1.63	48.90	—	43.20	—	3.03	—	96.76	—	0.07	1.43	—	0.50	0.83	—	0.17	—	ФХ
23	31-1 Ц	5125-01	—	34.99	32.78	—	19.01	—	14.16	0.26	101.20	—	1.19	0.75	—	0.07	0.39	—	0.61	0.01	ХП
24	31-2 К	5125-01	—	34.79	32.05	—	18.92	—	13.93	—	99.69	—	1.20	0.74	—	0.07	0.39	—	0.61	—	ХП
25	35-1 Ц	5124-01	1.11	21.79	41.44	—	20.72	—	14.32	—	99.38	0.03	0.79	1.00	—	0.18	0.35	—	0.65	—	СФАХ
26	35-2 К	5124-01	1.11	19.41	42.65	—	24.41	—	11.49	—	99.07	0.03	0.72	1.07	—	0.19	0.46	—	0.54	—	СФАХ
27	35-3 К	5124-01	3.47	14.00	30.81	0.32	24.41	—	—	22.50	95.51	0.10	0.61	0.91	0.01	0.38	0.38	—	—	0.62	-
28	47-1 Ц	5129-01	4.60	14.46	31.16	—	39.10	—	1.00	—	99.32	0.11	0.55	0.80	—	0.54	0.52	—	0.48	—	-
29	47-2 К	5129-01	4.58	14.27	31.07	—	39.32	—	10.12	—	99.36	0.11	0.54	0.79	—	0.55	0.51	—	0.49	—	-
30	48-1 Ц	5129-01	—	19.60	46.16	—	25.01	—	9.12	—	99.89	—	0.74	1.16	—	0.10	0.57	—	0.43	—	АХ
31	48-2 К	5129-01	0.33	1.30	38.52	—	54.21	—	1.72	—	96.08	0.01	0.06	1.14	—	0.79	0.90	—	0.10	—	ФХ
32	54-1 Ц	5137-01	—	11.85	52.38	—	27.83	—	7.88	—	99.94	—	0.46	1.37	—	0.16	0.61	—	0.39	—	СФАХ
33	54-2 К	5137-01	0.41	1.01	42.46	—	50.15	—	2.81	—	96.84	0.01	0.04	1.24	—	0.70	0.85	—	0.15	—	ФХ
34	66-1 Ц	5138-04	—	9.48	54.53	—	28.80	—	6.69	—	99.50	—	0.38	1.46	—	0.16	0.66	—	0.34	—	СФХ
35	66-2 К	5138-04	0.28	1.06	46.45	—	47.03	—	2.87	—	97.69	0.01	0.05	1.35	—	0.60	0.84	—	0.16	—	ФХ
36	67-1 Ц	5138-03	0.23	12.29	50.30	—	28.58	—	8.34	—	99.74	0.01	0.48	1.31	—	0.20	0.59	—	0.41	—	СФАХ
37	67-2 К	5138-03	0.66	1.54	37.02	—	52.06	—	2.70	—	93.98	0.02	0.07	1.11	—	0.80	0.85	—	0.15	—	ФХ

Примечание: Районы пробоотбора: 1—10, 13—16 — Кыввож; 11, 12, 17—22 — Средний Кыввож; 23—37 — Димтэмтэль. Используемые сокращения для обозначения места точки микроанализа: Ц — центр, К — кайма. Т. ш. — тип шпинели. Аббревиатура номенклатуры хромшпинелидов Н. В. Павлова [16]: АХ — алюмохромит, СФАХ — субферриалюмохромит, ХП — хромпикотит, СФХ — субферрихромит, ФХ — феррихромит, Х — хромит, Мгт — магнетит.

Note: The location of the sampling: 1—10, 13—16 — Kyvvozh; 11, 12, 17—22 — Srednij Kyvvozh; 23—37 — Dimtem"yol". Abbreviations used to mark the location of the point microanalysis: Ц — center, К — rim. Т. ш. — spinel type. The abbreviation by N. V. Pavlov [16]: АХ — aluminochromite, СФАХ — subferri-aluminochromite, ХП — chrompicotite, СФХ — subferrichromite, ФХ — ferrichromite, Х — chromite, Мгт — magnetite.

Таблица 2. Химический состав микровключений в хромшпинелидах, мас. %
Table 2. Compound composition of microinclusions in chrome spinels, wt. %

№ No.	Номер анализа Spectrum No.	Номер образца Sample No.	Компонент / Component										Сумма Total	Минерал / Mineral
			SiO ₂	TiO ₂	Al ₂ O ₃	Cr ₂ O ₃	FeO	MgO	CaO	K ₂ O	Na ₂ O	Sc ₂ O ₃		
1	11/3	50401	52.77	—	5.55	1.49	2.55	21.85	13.02	0.23	1.24	0.21	98.91	диопсид / diopside (Mg _{1.28} Ca _{0.55} Na _{0.09} Fe _{0.08}) ₂ (Si _{1.74} Al _{0.22} Cr _{0.04}) ₂ O ₆
2	11/4	50401	51.93	—	6.37	1.92	2.74	21.6	12.85	—	1.43	—	98.84	диопсид / diopside (Mg _{1.26} Ca _{0.54} Na _{0.11} Fe _{0.09}) ₂ (Si _{1.70} Al _{0.25} Cr _{0.05}) ₂ O ₆
3	11/5	50401	49.08	—	6.83	7.72	5.46	21.24	11.26	—	1.38	—	102.97	диопсид / diopside (Mg _{1.24} Ca _{0.47} Fe _{0.18} Na _{0.11}) ₂ (Si _{1.55} Al _{0.26} Cr _{0.19}) ₂ O ₆
4	14/3	5107-3	44.4	0.47	12.99	3.08	3.17	19.27	12.77	0.13	3.45	0.27	100.00	диопсид / diopside (Mg _{1.11} Ca _{0.53} Na _{0.26} Fe _{0.10}) ₂ (Si _{1.43} Al _{0.49} Cr _{0.08}) ₂ O ₆
5	14/4	5107-3	43.96	0.49	13.12	3.09	3.14	19.01	13.00	0.25	3.35	0.22	99.63	диопсид / diopside (Mg _{1.10} Ca _{0.55} Na _{0.25} Fe _{0.10}) ₂ (Si _{1.42} Al _{0.50} Cr _{0.08}) ₂ O ₆
6	15/3	5107-3	44.00	—	6.14	6.98	2.53	20.19	11.57	—	2.13	—	93.54	диопсид / diopside (Mg _{1.23} Ca _{0.51} Na _{0.17} Fe _{0.09}) ₂ (Si _{1.55} Al _{0.26} Cr _{0.19}) ₂ O ₆
7	22a/1	5107-3	32.47	—	14.91	4.79	1.28	34.34	—	—	—	—	87.79	пироксен? / pyroxene? (Mg _{1.96} Fe _{0.04}) ₂ (Si _{1.21} Al _{0.65} Cr _{0.14}) ₂ O ₆
8	26/3	5107-05	57.25	—	1.57	1.42	1.58	24.01	12.76	—	0.45	—	99.04	диопсид / diopside (Mg _{1.39} Ca _{0.53} Fe _{0.05} Na _{0.03}) ₂ (Si _{1.90} Al _{0.06} Cr _{0.04}) ₂ O ₆
9	28a/2	5107-05	45.01	0.58	11.56	2.97	2.79	19.18	12.81	0.26	2.85	—	98.01	диопсид / diopside (Mg _{1.14} Ca _{0.55} Na _{0.22} Fe _{0.09}) ₂ (Si _{1.47} Al _{0.45} Cr _{0.08}) ₂ O ₆
10	35/3	5124-01	46.3	1.09	32.20	1.79	3.05	1.07	—	10.01	0.84	—	96.35	мусковит / muscovite (K _{0.89} Na _{0.11})(Al _{1.55} Fe _{0.18} Mg _{0.11} Cr _{0.10} Ti _{0.06}) ₂ [(AlSi ₃ O ₁₀)(OH,F) ₂
11	61/4	5134-01	43.31	—	12.71	2.69	3.93	18.22	12.84	0.31	3.40	—	97.41	диопсид / diopside (Mg _{1.07} Ca _{0.54} Na _{0.26} Fe _{0.13}) ₂ (Si _{1.43} Al _{0.50} Cr _{0.07}) ₂ O ₆
12	63a/1	5138-04	45.35	0.28	10.74	3.01	1.85	19.95	12.62	0.16	3.15	0.19	97.30	диопсид / diopside (Mg _{1.17} Ca _{0.53} Na _{0.24} Fe _{0.06}) ₂ (Si _{1.50} Al _{0.42} Cr _{0.08}) ₂ O ₆
13	64a/1	5138-04	48.56	1.90	7.23	1.04	7.69	16.37	17.68	—	0.41	—	100.88	диопсид / diopside (Mg _{0.97} Ca _{0.75} Fe _{0.25} Na _{0.03}) ₂ (Si _{1.68} Al _{0.29} Cr _{0.03}) ₂ O ₆
14	68/3	5138-03	44.99	0.43	11.96	2.91	3.37	19.12	13.00	0.29	3.05	—	99.12	диопсид / diopside (Mg _{1.12} Ca _{0.54} Na _{0.23} Fe _{0.11}) ₂ (Si _{1.47} Al _{0.46} Cr _{0.07}) ₂ O ₆

Примечание: Районы пробоотбора: 1—3 — Кыввож; 4—9 — Средний Кыввож; 10—14 — Димтэмъэль.

Note: The location of the sampling: 1—3 — Kyyvvozh; 4—9 — Sredniy Kyyvvozh; 10—14 — Dimtem"yol'.



Таблица 3. Элементный состав сульфидных микровключений в хромшпинелидах, мас. %

Table 3. Elemental composition of sulfide microinclusions in chrome spinels, wt. %

№ No.	Номер анализа Spectrum No.	Номер образца Sample No.	Компонент / Component											Сумма Total	Минерал Mineral
			O	Si	S	Al	Cr	Fe	Mg	Ca	Ni	Cu			
1	28a/1	5107-05	—	—	32.54	—	—	21.46	—	—	38.7	—	92.71	миллерит / millerite (Ni _{0.63} Fe _{0.37})S халькозин / chalcocite Cu ₂ S	
2	63a/2	5138-04	7.93*	1.45*	19.11	1.00*	3.91*	3.97*	3.57*	0.21*	—	65.00	106.15		

Примечание. Районы пробоотбора: 1 — Средний Кыввож, 2 — Димтэмьёл; * — элемент принадлежит кристаллической матрице минерала-хозяина (хромшпинелида).

Note: The location of the sampling: 1 — Sredniy Kyvvvozh, 2 — Dimtem"yol"; * — the element belongs to the crystal matrix of the host mineral (chromespinel).

CaO — 11—18. Особым образом выделяется концентрация алюминия, по которому хромдиопсиды явно подразделяются на две группы (6—7 и 11—13 мас. % Al₂O₃). Содержания хрома (Cr₂O₃) и железа (FeO) варьируются в одном и том же интервале — от 1 до 8 мас. %. Среди малых примесей постоянно отмечается натрия (0.4—3.5 мас. % Na₂O), который положительно скоррелирован с содержаниями алюминия. Примерно в половине случаев фиксируется присутствие титана (0.3—2.0 мас. % TiO₂) и калия (0.1—0.3 мас. % K₂O). Спорадически обнаруживаются следы скандия (0.1—0.3 мас. % Sc₂O₃).

Среди найденных силикатных микровключений в хромшпинелидах есть единичные экземпляры слюды (мусковит) и фаза пироксеноподобного состава (табл. 3, обр. 5107-05, спектр 26/3)*. Последняя в сравнении с другими обнаруженными микрофазами хромдиопсидов имеет повышенное содержание магния (34 мас. % MgO), содержит примерно столько же алюминия (12 мас. % Al₂O₃), практически не имеет в составе кальция и характеризуется весьма низкой суммой анализируемых компонентов (88 мас. %). В составе также есть небольшая примесь железа (1.3 мас. % FeO) и хрома (4.8 мас. % Cr₂O₃).

Среди микровключений обнаружены также сульфиды никеля и меди (табл. 3). Единичный крошечный эвгедральный экземпляр никелевого сульфида миллеритового состава размером около 2 мкм был обнаружен в сростании с микрокристаллом пироксена (размер ~ 20 мкм). Миллеритовая фаза находилась на границе между пироксеновой фазой и хромшпинелидом, являющимся минералом-хозяином. Ещё в одном случае и тоже на границе между ксеноморфной фазой пироксена (размер ~ 40 мкм) и хромшпинелидом было выявлено мелкое выделение сульфида меди халькозинового состава размером 1—2 мкм**.

* Часть составов пироксеноподобных включений обнаруживает сходство с амфиболами (например, мало SiO₂ и много Al₂O₃), поэтому для более точной их минеральной диагностики необходимо проведение более детальных исследований.

** Ввиду плохих сумм и перекрытия соседних зёрен при микроанализе в примере с фазой халькозинового (в том числе миллеритового) состава для более точной минеральной диагностики целесообразно проведение дополнительных исследований при помощи структурно-чувствительных методов.

Обсуждение результатов

Накопленный опыт изучения хромшпинелидов [5, 6, 8] продемонстрировал возможность использования их составов для прогнозирования типов пород, с которыми связано их происхождение. Опираясь на эти сведения, можно сделать уверенное заключение о том, что размещение фигуративных точек составов хромшпинелидов Кыввожского района (рис. 4) в полях (2, 4—7) дискриминационной комбинированной тригонограммы Н. В. Павлова указывает на их связь с ультрабазитами. Часть этих точек локализуется в полях пироксен-оливиновых пород типа лерцолитов, гарцбургитов и верлитов (данные [16]), а также формально попадает в поля ксенолитов базальтоидов, щелочных и толеитовых базальтов (данные [19]). Судя по опубликованным работам [6, 15], на Среднем Тимане схожими составами (поля 2—5, 13, рис. 5) характеризуются хромшпинелиды (центральные неизменённые области индивидов) из позднерифейского четласского дайкового комплекса [14], сложенного субщелочными дайковыми ультрабазитами (пикритами и лампрофирами), которые пространственно, структурно и по времени формирования тесно ассоциируются с карбонатитами, редкометалльными щелочными метасоматитами (фенитами, слюдитами, полевошпатовыми метасоматитами) и жильными гидротермалитами. Группа фигуративных точек составов хромшпинелидов Кыввожского района перекрывает одну из частей гетерогенного облака составов хромшпинелидов (наиболее хромистых) из среднетиманских щелочных лампрофиров (альнётитов) трубки взрыва Умбинская одноименного кимберлитового поля (поля 4, 5, 13 рис. 5) [10].

Кроме того, значительное количество составов высокохромистых индивидов хромшпинелидов Кыввожского района локализуется в поле дунитов (поля 6, 7, рис. 4), причем преимущественно в этом поле оказывались хромшпинелиды из верховий Среднекыввожского участка. Эта особенность отличает данную группу от хромшпинелидов из известных на сегодня проявлений ультрамафитов Среднего Тимана. Иные объекты с такими же часто встречающимися высокохромистыми составами хромшпинелидов на Среднем Тимане пока не установлены.

Ещё одной отличительной чертой хромшпинелидов из золотоносных аллювиальных псефитов центральной части Вымского горст-антиклинария оказалась статистически редкая встречаемость хромшпинелидов

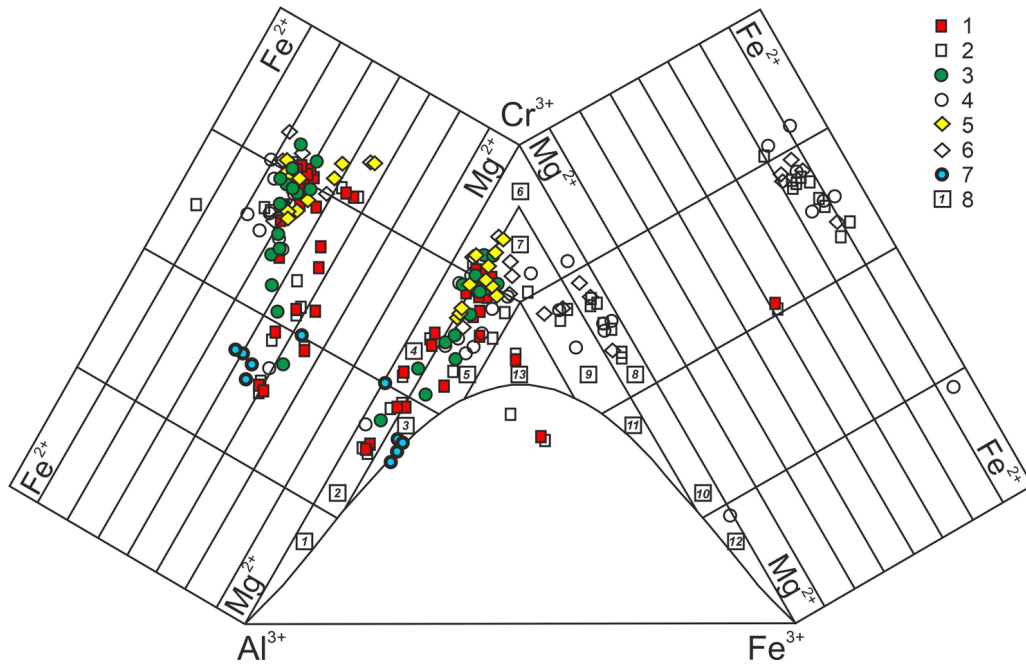


Рис. 4. Комбинированная тригонограмма ($\text{Al}^{3+}\text{--Cr}^{3+}\text{--Fe}^{3+}\text{--Mg}^{2+}\text{--Fe}^{2+}$) составов хромшпинелидов из золотосных псефитов различных участков Кыввожского россыпного поля: 1, 2 — Димтэмъёльский (верховья); 3, 4 — Кыввожский; 5, 6 — Среднекыввожский (верховья); 7 — включения в пиропсах (данные [5]).

1, 3, 5, 7 — точки анализа в центре неизменённой области зерна (центр); 2, 4, 6 — точки анализа на неизменённой периферии зерна или в участках эпигенных преобразований (каймы); 8 — классификационные поля составов шпинелевых разновидностей в системе твёрдых растворов «хромит — пикотит — магнетит» по Н. В. Павлову [16]: 1 — пикотит, 2 — хромпикотит, 3 — субферрихромпикотит, 4 — алюмохромит, 5 — субферриалюмохромит, 6 — хромит, 7 — субферрихромит, 8 — феррихромит, 9 — субалюмоферрихромит, 10 — хроммагнетит, 11 — субалюмохроммагнетит, 12 — магнетит, 13 — ферриалюмохромит

Fig. 4. Combined trigonogram ($\text{Al}^{3+}\text{--Cr}^{3+}\text{--Fe}^{3+}\text{--Mg}^{2+}\text{--Fe}^{2+}$) of compositions of chrome spinels from auriferous psephits from different mining districts of Kyvvozhsky placer field: 1, 2 — Dimtem'yol'sky (upstream); 3, 4 — Kyvvozhsky; 5, 6 — Srednekyvvozhsky (upstream); 7 — inclusions in pyropes (data from [5]).

1, 3, 5, 7 — analyses points on the center of unaltered area of grains; 2, 4, 6 — analyses points on the unaltered periphery of grains or on zones of epigenic alterations (rims); 8 — classification fields of spinel composition varieties in the system of solid solutions of «chromite — picotite — magnetite» according to N. V. Pavlov [16]: 1 — picotite, 2 — chrompicotite, 3 — subferrichrompicotite, 4 — aluminochromite, 5 — subferrialluminochromite, 6 — chromite, 7 — subferrichromite, 8 — ferrichromite, 9 — subaluminoferrichromite, 10 — chrommagnetite, 11 — subaluminochrommagnetite, 12 — magnetite, 13 — ferrialluminochromite

лидов субферрихромпикотитового состава (поле 3, рис. 4). В выборке данной работы такие составы вообще не обнаружены. Единичные зёрна такого состава зафиксированы лишь в псефитах на промышленном участке Среднекыввожской россыпи [3]. Примечательно, что в это же самое поле субферрихромпикотитов попадает большая часть индивидуальных составов микровключений хромшпинелидов из лиловых хромсодержащих пиропов, найденных в совершенно разных местах на Вольско-Вымской гряде, в том числе в пределах Кыввожского золотороссыпного поля [5]. Судя по данным работы [5], указанные пиропы принадлежат лерцолитовому парагенезису и аналогичны по составу пиропам из Умбинского кимберлитового поля. Из числа ультрамафитовых объектов Среднего Тимана частое присутствие субферрихромпикотитовых составов весьма характерно для хромшпинелидов из диатремы Ан-4 (одно из трубчатых тел, обнаруженных при заверке геофизических аномалий редкоземельно-редкометалльного рудного поля «Исток Мезени»), расположенной в верховьях р. Мезень на Четласском поднятии (поле 3, рис. 5, данные [15]). Такие

же составы встречаются в одном из контуров хромшпинелидов трубки взрыва Умбинская (рис. 5, данные [10]), а также, хотя и в небольшом числе примеров, в других ультрамафитах Среднего Тимана (рис. 5, данные [6, 15]).

Специфика составов хромшпинелидов Кыввожской площади разных золотосных участков выражена в статистическом различии по расчётному соотношению двухвалентных ионов магния и железа. На рис. 4 (диаграммное крыло $\text{Fe}^{2+}\text{--Mg}^{2+}$ слева) заметно, что точки составов из Димтэмъёльского и Кыввожского участков обособлены и создают два субпараллельных тренда. При этом группа хромшпинелидов Среднекыввожского участка также явно отличается от хромшпинелидов других участков своей компактностью состава и большими значениями содержания двухвалентного железа. Данные закономерности являются дополнительным аргументом в пользу того, что источники хромшпинелидов Кыввожского золотороссыпного поля (т. е. предполагаемые неустановленные тела магматитов) неоднородны, поэтому могут быть своими у каждого золотосного участка. В противном случае при наличии удалённых питающих источников хромшпинелидов мы

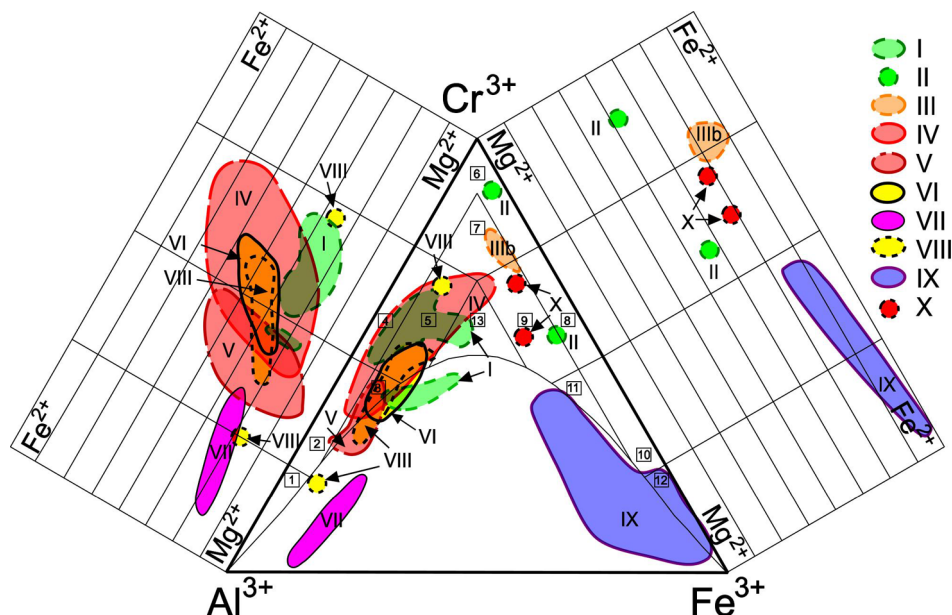


Рис. 5. Комбинированная тригонограмма (Al^{3+} - Cr^{3+} - Fe^{3+} - Mg^{2+} - Fe^{2+}) составов хромшпинелидов из ультрамафитов и россыпей Среднего Тимана: I, II — альнётиты Умбинской трубки взрыва (данные [10]): I — центр зерна, II — аналоги каём, насыщенных магнетитовым компонентом; III — алмаз-золото-редкометалльная палеороссыпь Ичетью (данные [4]): IIIa — центр зерна (данные приведены на рис. 6), IIIb — кайма; IV, V — щёлочно-ультраосновные породы Четласского поднятия (данные [15]), IV — обр. 232 (дайкавое тело р. Косью, «раздвиг А»), V — обр. An-4 (трубчатое тело, геофизическая аномалия); VI—X — ультрамафиты Четласского дайкового комплекса, скв. № 55, р. Косью (данные [6]): VI, VII — пироксенитовые ксенолиты, VI — центр зерна, VII — периферийная (реакционная) зона зерна, VIII—X — обломочные хромшпинелиды: VIII — центр и реакционная (внутренняя) кайма зёрен, IX — магнетитовая (внешняя) кайма зёрен, X — низкоглинозёмистые хромшпинелиды (аналоги каём, насыщенных магнетитовым компонентом). Обозначение классификационных полей составов разновидностей хромшпинелидов такие же, как на рис. 4

Fig. 5. Combined trigonogram (Al^{3+} - Cr^{3+} - Fe^{3+} - Mg^{2+} - Fe^{2+}) of compositions of chrome spinels from ultramafic rocks and placers of the Middle Timan: I, II — alnoites of Umbinskaya explosion pipe (data from [10]), I — grain center, II — analogues of rims saturated by magnetite component; III — Ichet'y diamond-gold-rare-metal paleoplacer (data from [4]): IIIa — grain center (the data are represented in Fig. 6), IIIb — grain rim; IV, V — alkaline-ultramafic rocks of the Chetlas uplift [15] (data from): IV — sample 232 (dyke body of the Kos'y River, «Swell A»), V — sp. An-4 (pipe-like body, geophysical anomaly); VI—X — ultramafic rocks of the Chetlas dyke complex, borehole № 55, Kos'y river (data from [6]): VI, VII — pyroxenite xenoliths: VI — grain center, VII — peripheral (reactional) grain zone; VIII—X — detrital chromspinelides: VIII — center and reactional (inner) grain rim, IX — magnetitic (outer) grain rim, X — low-alumina chrome spinels (analogues of rims saturated by magnetite component). Designation of classification fields of compositions of chrome spinel varieties is the same as in Fig. 4

бы не наблюдали таких различий составов хромшпинелидов (включая акцессорные минералы тяжёлой фракции) по разным долинам Кыввожского золотоносного района из-за значительного перемешивания транзитного обломочного материала.

Следует отметить, что продемонстрированное выше общее сходство составов хромшпинелидов Кыввожского и других районов Среднего Тимана, лежащих на один и тот же генеральный «ультрабазитовый тренд», является во многом отражением единства природы вмещающих глубинных перидотитовых пород. Как видно из работы [19], такими же составами характеризуются хромшпинелиды из ультрабазитов других районов мира. В вопросе же географии источников хромшпинелидов необходимы дополнительные сведения — некие региональные минерагенетические «метки», своего рода «эндемичные» типоморфные особенности. В данном случае, по нашему мнению, эту роль могут играть такие типоморфные характеристики хромшпинелидов, как состав и видовое разнообразие содержащихся в них минеральных микровключений, внутреннее (анатомическое) строение, и в особенности состав эпигенных каём хромшпинелидов,

который, как мы полагаем, должен быть чувствителен к региональному геохимическому фону и специфике региональных геологических процессов.

Так, данные по составам реакционных каём [6] хромшпинелидов из пироксенитовых ксенолитов в ультрамафитах четласского дайкового комплекса бассейна р. Косью (контур VII, примыкающий к полям 1, 2, а также контур IX, примыкающий к полям 10—12, рис. 5) позволяют нам предположить, что хромшпинелиды из магматитов этого района, по-видимому, нет на Кыввожской золотоносной площади или они являются минералогической редкостью. Данный вывод основан на том, что в этом районе Тимана пока не удалось обнаружить статистически значимой по встречаемости группы хромшпинелидов с такими высокими содержаниями шпинелевого или магнетитового миналов в реакционных каймах. Аналогичная ситуация характерна для хромшпинелидов, встречающихся в среднедевонской алмазо-золото-редкометалльной палеороссыпи Ичетью. Опубликованные данные [4] демонстрируют отсутствие тесного сходства составов их эпигенных каём (контур III, поле 7 на рис. 5) с таковыми у основной массы хромшпинели-

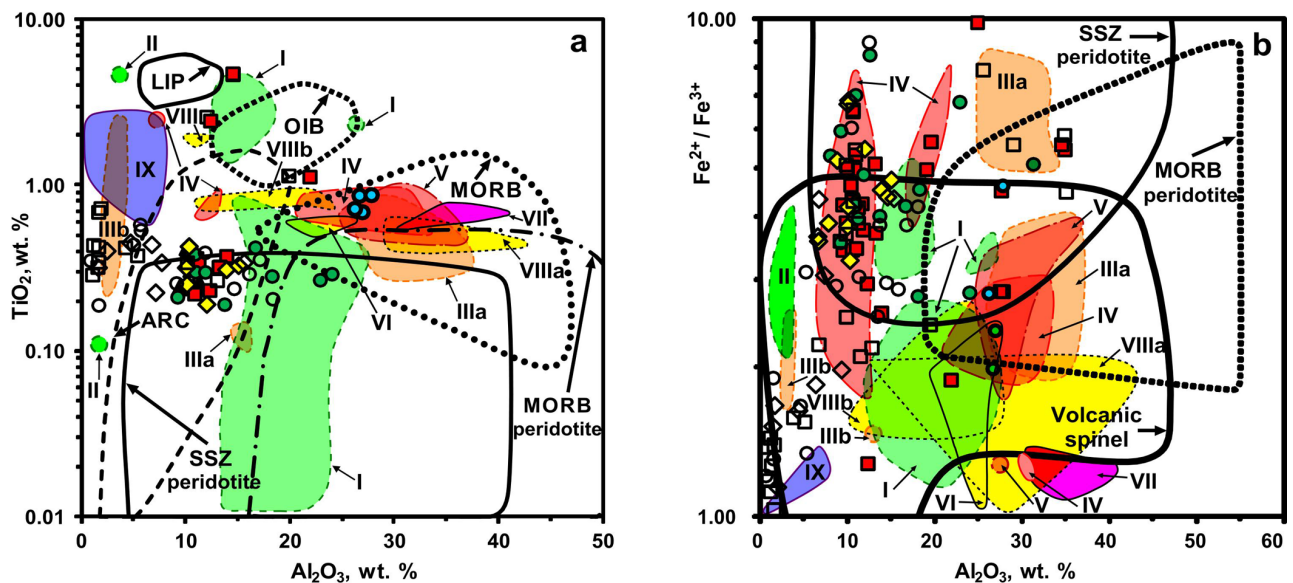


Рис. 6. Диаграммы $\text{TiO}_2\text{--Al}_2\text{O}_3$ (a) и $\text{Fe}^{2+}/\text{Fe}^{3+}\text{--Al}_2\text{O}_3$ (b) составов хромшпинелидов с разных участков золотороссыпного Киввожского поля и объектов сравнения — ультрамафитов и россыпей Среднего Тимана (данные работ [4, 6, 10, 15]) и вулканитов из различных геодинамических обстановок по данным [20]. ARC — островодужные вулканиты, SSZ peridotite — перидотиты супрасубдукционной зоны, OIB — базальты океанических островов, MORB — базальты срединно-океанических хребтов, LIP — обширные изверженные комплексы базальтов (платобазальты), Volcanic spinels — шпинели, сформировавшиеся в вулканических процессах в земной коре. Условные обозначения составов хромшпинелидов (символы и поля) с участков золотороссыпной Киввожской площади и объектов сравнения Среднего Тимана такие же, как на рис. 4, 5

Fig. 6. Diagrams $\text{TiO}_2\text{--Al}_2\text{O}_3$ (a) and $\text{Fe}^{2+}/\text{Fe}^{3+}\text{--Al}_2\text{O}_3$ (b) of chrome spinel compositions from various mining districts of Kivvozh gold area and comparison objects —ultramafic rocks and placers of the Middle Timan (data from [4, 6, 10, 15]) and volcanites from various geodynamic settings (data from [20]). ARC — island-arc magmas, SSZ — supra-subduction zone peridotites, OIB — ocean-island basalts, MORB — mid-ocean ridge basalts, LIP — large igneous province of basalts (flood basalts), Volcanic spinels — chromespinels formed during volcanic processes in the earth's crust. Legends of chrome spinel compositions (symbols and fields) from mining districts of Kivvozh gold area and comparison objects of the Middle Timan are the same as in Fig. 4, 5

дов из Киввожского района (поля. 7—9 на рис. 4) [3]. Ещё заметнее ичетьюские хромшпинелиды выделяются по повышенному содержанию цинка в реакционных каймах. Исключение составляют лишь редкие единичные индивиды киввожских хромшпинелидов, фигуративные составы каём которых всё же оказываются в контурах составов аналогичных краевых участков хромшпинелидов из других объектов Среднего Тимана.

Задачу выявления источников хромшпинелидов определённо осложняет неполнота сведений по их составам из каём в некоторых опубликованных работах. Так, в работе [10], по-видимому, приводятся данные в основном по центральным областям индивидов. Кроме того, реакционных оболочек у минеральных зёрен может не быть вовсе. Так, отсутствие каких-либо каём у хромшпинелидов Киввожского района уверенно фиксировалось в более чем половине случаев (~ 60 %).

Согласно данным работ [19, 21], составы каём хромшпинелидов, характеризующихся повышенным вкладом магнетитового минала (поля 9, 12, 13 на рис. 4) ложатся на «тренд метаморфизации» и указывают на коровые обстановки эпигенного формирования таких каём в условиях повышенной фугитивности кислорода. В аналогичной коровой обстановке, судя по всему, формируются и микрокристаллические идиоморфные хромшпинелиды из связующей массы кимберлитов [1].

В связи с задачами поиска источников самородной минерализации (в особенности минералов платиновой группы) в Киввожском золотороссыпном районе, определённую типоморфную значимость имеют обнаруженные здесь хромшпинелиды с микровключениями никеля и меди. По нашему мнению, находки таких хромшпинелидов могут сигнализировать о присутствии на площади работ магматических пород, содержащих минералы платиновой группы [3]. К примеру, по данным работы Р. И. Шайбекова и его коллег [18], акцессорные сульфиды никеля и меди достаточно широко распространены в платиноносных хромовых рудах Лагортинско-Кершорской площади Войкаро-Сынинского ультрабазитового массива на Полярном Урале.

В данной выборке хромшпинелидов, как мы отметили выше, в нескольких примерах удалось найти микровключения клинопироксенов (хромдиопсидов), а также сульфидов никеля (миллерит) и меди (халькозин). Отметим, что находки подобных сульфидных микроминералов ранее делались при изучении магматических комплексов Среднего Тимана. Так, в частности, при изучении ультрамафитов Четласского дайкового комплекса р. Косью в метасоматических жилках кальцит-альбитового состава, богатых редкоземельными минералами, обнаруживались также и сульфиды, в числе которых были миллерит, пентландит и халькопирит, ассоциирующие со сфалеритом и молибденитом

[6]. Как видно из работы [15], богатые включениями хромшпинелиды, похожие на редкие экземпляры из Кыввожского района (рис. 3, е), встречаются в щёльно-ультраосновных породах Четласского поднятия (обр. 232, дайковое тело р. Косью, раздв. А).

Согласно выводам работы В. С. Каменецкого и его соавторов [20], состав хромшпинелидов удовлетворительно отражает особенности геотектонических обстановок, в которых могли формироваться вмещающие хромшпинелиды исходные магматические породы. Так, на дискриминационных диаграммах $TiO_2-Al_2O_3$ (рис. 6, а) и $Fe^{2+}/Fe^{3+}-Al_2O_3$ (рис. 6, б) отчётливо видно, что среднетиманские хромшпинелиды располагаются в полях самых различных геотектонических зон (фаций).

Формирование одной наиболее многочисленной группы хромшпинелидов Кыввожского золотороссыпного поля и соответствующих им исходных магматических пород могло быть связано с геотектонически активными обстановками в зонах спрединга и субдукции. Формирующиеся в этих условиях хромшпинелиды отличаются пониженным в целом содержанием титана и трёхвалентного железа (расчётного вклада магнетитового минала). Внутри этой многочисленной группы выделяется обширная подгруппа хромшпинелидов с относительно невысокой глинозёмистостью (низкоглинозёмистые хромшпинелиды), составы которой отвечают островодужным магматическим комплексам (поле ARC) и формально также входят в контур перидотитов зон субдукции (поле SSZ peridotite). В этом же поле ARC (рис. 6, а) обособлено и компактно локализуются точки составов, тоже низкоглинозёмистых, но несколько более титанистых хромшпинелидов из интрузивов щёльно-ультраосновных пород [15]: контур IV — дайковое тело, раздв. А на р. Косью [6]; контур XIIIb — все низкоглинозёмистые обломочные хромшпинелиды из ультрамафитов скв. № 55, р. Косью. В поле ARC также попадает и некоторое количество хромшпинелидов из альнётитов Умбинской трубки взрыва [10] (контур I). Причём большая часть хромшпинелидов из этого среднетиманского объекта локализуется в поле перидотитов зон субдукции (SSZ peridotite). Среди хромшпинелидов россыпи Ичетью есть крошечная компактная популяция низкоглинозёмистых и низкотитанистых индивидов минерала с составами [4] (контур IIIa), размещающимися в полях ARC и SSZ.

Как видно, для среднетиманских объектов данная подгруппа низкоглинозёмистых хромшпинелидов Кыввожского золотороссыпного поля является обособленной, а магматических проявлений хромшпинелидов с аналогичными характеристиками пока не установлено. Однако следует отметить, что это справедливо только в отношении положения точек составов данной подгруппы на дискриминационной диаграмме $TiO_2-Al_2O_3$ (рис. 6, а). На другой же диаграмме, $Fe^{2+}/Fe^{3+}-Al_2O_3$ (рис. 6, б), данная подгруппа практически совпадает с подгруппой низкоглинозёмистых хромшпинелидов из щёльно-ультраосновных пород интрузивов р. Косью Четласского поднятия [15] (пара контуров IV в левой части диаграммы), а также альнётитов Умбинской трубки взрыва [10] (контур I). На диаграмме рис. 6, б также видно, что значительная часть хромшпинелидов из разных районов Среднего Тимана вхо-

дит в контур перидотитов супрасубдукционной зоны (SSZ) как отражение сходства их происхождения.

Ещё одна, уже умеренно-глинозёмистая, подгруппа хромшпинелидов Кыввожского золотороссыпного поля, тоже с низкими содержаниями титана и трёхвалентного железа, но крайне редко встречающаяся (единичные зёрна из образцов Кыввожской россыпи), локализована в полях хромшпинелидов из базальтоидов (поле MORB) и перидотитов (поле MORB peridotite) срединно-океанических хребтов (рис. 6, а, б), имеющая, по-видимому, отношение к древним, формировавшимся в обстановках растяжения земной коры рифтовым зонам Тимана. Судя по составам включений хромшпинелидов в лерцолитовых пиропсах из Кыввожского района [5], их происхождение также может быть связано с магматитами, относящимися к областям активной спрединговой геотектоники (поле MORB) из тех же самых рифтовых зон. Среди умеренно-глинозёмистых хромшпинелидов из других среднетиманских объектов хромшпинелиды такого типа, локализующиеся в поле MORB, напротив, встречаются нередко. К таковым относятся хромшпинелиды из альнётитов Умбинской трубки взрыва [10] (контур I), среднедевонской палеороссыпи Ичетью [4] (контур IIIa), щёльно-ультраосновных пород Четласского поднятия [15] (контур IV — дайковое тело р. Косью, раздв. А и контур V — An-4, трубчатое тело, геофизическая аномалия), ультрамафитов Четласского дайкового комплекса [6] (контур VI и VIII — скв. № 55, р. Косью).

Очень редкими для среднетиманских хромшпинелидов вообще и хромшпинелидов Кыввожского золотороссыпного поля в частности оказались экземпляры с составами, локализующимися на диаграмме (рис. 6, а) в полях платформенных обстановок, отвечающих трапповому магматизму (поле LIP и OIB). Специфика составов данных хромшпинелидов — повышенная титанистость и доля магнетитового минала. Помимо редких зёрен хромшпинелидов из верхний Димтэмьельского участка Кыввожского золотороссыпного поля, в пространстве полей LIP и OIB оказались единичные индивиды из альнётитов Умбинской трубки [10] (контур I) и ультрамафитов Четласского дайкового комплекса [6] (контур VIII).

Несмотря на то, что использование выстроенных по составам хромшпинелидов дискриминационных диаграмм даёт в целом формальные результаты, требующие последующей верификации, выявленные при этом закономерности всё же представляются важными для объяснения происхождения хромшпинелидов.

Итак, учитывая размещение составов хромшпинелидов из золотоносных четвертичных псефитов Кыввожского золотороссыпного поля на различных дискриминационных диаграммах, мы пришли к заключению о вероятной петрогенетической связи изученных хромшпинелидов с гипербазитами. К последним среди известных на Тимане магматических пород могут относиться пикриты, лампрофиры и карбонатиты, подобные тем, что слагают позднерифейско-вендский щёльно-ультраосновной комплекс, установленный на Четласском поднятии и подробно описанный в различных работах [7, 11, 14, 17]. Вероятными источниками хромшпинелидов также могут быть щёльно-ультраосновные породы более молодого палеозойского возраста, подобные раннедевонским альнётитам [13] (описанным также как среднедевонские кимберлиты [11]),



тела которых расположены на Умбинском поле Среднего Тимана. Также в числе возможных источников хромшпинелидов могут быть магматические породы поздне-рифейского метадолеритового, а также позднедевонского долерито-базальтового комплексов, которые упоминаются здесь гипотетически, так как долериты и базальтоиды могут содержать ксенолиты глубинных пород, в которых есть хромшпинели. А ряд фигуративных точек составов изученных хромшпинелидов всё же формально попал в поля базальтоидов. Однако никаких сведений о хромшпинелидах в составе таких комплексов в изучаемом районе нами пока не найдено.

Обнаруженные разнообразные типы хромшпинелидов отчётливо указывают на многообразие глубинных магматитов на Среднем Тимане как отражение сложности его геотектонического строения и истории его формирования. При прогнозировании местонахождения полей магматитов и связанных с ними полезных ископаемых эти сведения ценны и также необходимы при прогнозировании возможных направлений массопереноса. В качестве показательного примера можно упомянуть дискуссию о происхождении алмазов Ичетьюской россыпи. В числе питающих областей и соответствующих возможных направлений массопереноса от различных коренных источников в разное время назывались Архангельская алмазоносная провинция, Четласский Камень, Северный Тиман и Вольско-Вымская гряда (т. е. южное направление массопереноса в отношении Ичетьюского россыпного поля, упомянутое в работе А. Б. Макеева и др. [9]).

В сложившихся современных представлениях Тиман геотектонически определяется как пассивная платформенная окраина [8, 17]. Вместе с тем полученный нами экспериментальный материал по хромшпинелидам Вольско-Вымской гряды позволяет предполагать наличие питающих источников, связанных с активным геотектоническим режимом. Их, очевидно, нельзя ожидать в рамках парадигмы геотектоники Тимана как пассивной платформенной окраины ни к западу, ни к северу, ни на самой Вольско-Вымской гряде. Хотя нами и изучались хромшпинелиды из голоценовых аллювиальных псефитов, контаминированных обломочным материалом из плейстоценовых осадков, в которых гипотетически могут оказаться минералы из областей активной геотектоники, думается всё же, что объяснить всё только ледниковым транзитом не удастся. Поэтому в вопросах прогнозирования массопереноса глубинных акцессорных минералов (включая ценные) целесообразно обратить внимание на их возможный источник, располагающийся к востоку и северо-востоку от современной территории Вольско-Вымской гряды, где, по данным работы Н. Б. Кузнецова и его соавторов [8], с рубежа венда и кембрия в результате столкновения двух палеоконтинентов, Балтики и Арктиды, возник коллизионный ороген протоуралид-тиманид. Для нашего случая очень важно отметить, что, по мнению Н. Б. Кузнецова и его коллег, формирование палеоорогена происходило с шарьированием комплексов окраин сталкивающихся континентов далеко в пределы этих континентов. Последнее помогает отчасти объяснить непонятное появление глубинных минералов геотектонически активных областей на территории тиманской платформенной окраины.

В настоящее время, по данным работы [8], ороген протоуралид-тиманид тектонически переработан и эродирован. Фрагменты этой реликтовой структуры сейчас располагаются к востоку от Тимана и погребены под осадками Печорской плиты.

В завершение отметим, что установленное многообразие хромшпинелидов может быть и отражением сложности (зональности) строения магматических тел (подробно описанной в работе [12]), с которыми они связаны. Этот вопрос мы здесь подробно образом не рассматриваем, так как пока у нас нет никаких сведений о соответствующих хромшпинелидсодержащих телах. Однако мы допускаем, что подобного рода сведения крайне важны для верификации прогнозов, сделанных на основе изучения составов хромшпинелидов, о которых мы говорили в настоящей работе, в особенности в связи с их прогнозируемым различием по геотектоническим режимам формирования.

Выводы

Хромшпинелиды, встречающиеся в золотоносных аллювиальных голоценовых псефитах Кыввожского золотороссыпного поля, генетически связаны с исходными материнскими породами преимущественно щелочно-ультраосновного состава. Аналогами данных пород на Среднем Тимане являются магматиты типа ультрамафитов Четласского позднерифейско-вендского комплекса, а также породы, аналогичные раннесреднедевонским альнётитам, обнаруженным в пределах Умбинского поля на Среднем Тимане. Небольшая группа хромшпинелидов гипотетически может быть связана с породами позднерифейского метадолеритового, а также позднедевонского долерито-базальтового комплексов.

Особенности химических составов хромшпинелидов из отдельных участков (водотоков) Кыввожской площади позволяют говорить об их в целом местном и вдобавок внутريدолинном происхождении. Основное отличие хромшпинелидов Кыввожской площади от хромшпинелидов из других районов Среднего Тимана заключено в специфике элементных составов их эпигенных реакционных оболочек. Отличие хромшпинелидов из разных долинных участков Кыввожской площади выражено в различии их усреднённых элементных составов.

Формирование пород, являющихся источниками хромшпинелидов Кыввожской площади, можно охарактеризовать как обстановки с различными геотектоническими режимами: от пассивных (платформенных) до активных (спрединга морского дна и островодужных зон субдукции). В этом данные хромшпинелиды близки хромшпинелидам из альнётитов диатрем Умбинского поля, прорывающих на севере Вымский антиклинорий. Формирование преобладающих типов хромшпинелидсодержащих пород Кыввожской площади тем не менее приурочено к зонам субдукции. В этом их основное отличие от ультрамафитов Четласского поднятия и вероятных источников Ичетьюской россыпи, происхождение которых, по-видимому, связано с рифтовыми зонами Тимана (геотектонический режим — спрединг морского дна).

Анализ составов микровключений хромшпинелидов, обнаруженных в лерцолитовых пиропсах Кыввожской золотоносной площади, указывает на воз-

можное образование пород, содержащих данный тип пироповых гранатов, в активной геотектонической обстановке рифтовых зон.

Сочетание пестроты прогнозируемых геотектонических обстановок формирования магматических источников хромшпинелидов и внутривулканического питания золотоносных псифитов различных участков Кыбужской площади за счёт местных источников может быть объяснено сложным геотектоническим развитием и строением Тимана, являющегося, по-видимому, шарьяж-антиклинорной структурой. Как в случае формирования интрузивных магматических комплексов, когда в одном дайковом теле могут оказаться ксенолиты пород различной глубины формирования, так и в случае эрозионно-денудационных процессов, охвативших шарьяж-антиклинорную структуру, в одном и том же месте (и магматическом теле!) могут оказаться хромшпинелиды из различных геотектонических обстановок.

Среди хромшпинелидов встречаются специфические для данного региона индивиды, содержащие микровключения сульфидов никеля и меди. Они, по-видимому, генетически связаны с магматическими телами, содержащими минералы платиновой группы. Обнаружение последних может иметь важное значение для понимания природы благороднометалльного тиманского рудогенеза.

Авторы благодарны работникам Института геологии ФИЦ Коми НЦ УрО РАН А. С. Шуйскому (электронная микроскопия сканирующего типа, микрозондовый анализ), Н. Х. Хачатурян (выделение минералов тяжёлой фракции).

Литература

1. Богатиков О. А., Гаранин В. К., Кононова В. А., Кудрявцева Г. П., Васильева Е. Р., Верзак В. В., Веричев Е. М. Парсаданян К. С., Посухова Т. В. Архангельская алмазоносная провинция (геология, петрография, геохимия и минералогия) / Под ред. О. А. Богатикова. М.: МГУ, 1999. 524 с.

2. Булах А. Г., Золотарёв А. А., Кривовичев В. Г. Структура, изоморфизм, формулы, классификация минералов. СПб.: СПбГУ, 2014. 133 с.

3. Глухов Ю. В., Макеев Б. А., Варламов Д. А., Шевчук С. С., Филиппов В. Н. Генетико-информативная значимость хромшпинелидов Среднекыбужского золотоносного россыпе-проявления (Средний Тиман) // Современные проблемы теоретической, экспериментальной и прикладной минералогии (Юшкинские чтения — 2016): Материалы минер. семинара с межд. участием. Сыктывкар: ИГ Коми НЦ УрО РАН, 2016. С. 32—33.

4. Глухов Ю. В., Макеев Б. А., Варламов Д. А., Шевчук С. С., Исаенко С. И. Хромшпинелиды с цинксо-держащими эпигенетическими каймами из девонских конглобрективных горизонтов россыпе-проявления Ичетью (Средний Тиман) // Литосфера. 2015. № 2. С. 103—120.

5. Глухов Ю. В., Макеев Б. А., Сокерин М. Ю. Типоморфизм глубинных акцессорных минералов Вымской горстовой структуры (Средний Тиман). Оливин, пиропы // Вестник геонаук. 2020. № 10 (310). С. 3—10.

6. Голубева И. И., Мокрушин А. В., Филиппов В. Н., Бурцев И. Н. Хромшпинелиды флюидо-эксплозивных даек Среднего Тимана // Труды Ферсмановской научной сессии ГИ КНЦ РАН. 2020. № 17. С. 117—127.

7. Голубева И. И., Д. Н. Ремизов, Бурцев И. Н., Филиппов В. Н., Шуйский А. С. Флюидоэксплозивные ультрамафиты дайкового комплекса Среднего Тимана и их парагенетическая связь с карбонатитами // Региональная геология и металлогения. 2019. № 80. С. 30—44.

8. Кузнецов Н. Б., Соболева А. А., Удортатина О. В., Герцева М. В., Андреичев В. Л., Дорохов Н. С. Доуральская тектоническая эволюция северо-восточного и восточного обрамления Восточно-Европейской платформы. Часть 2. Позднедокембрийско-кембрийская коллизия Балтики и Арктиды // Литосфера. 2007. № 1. С. 32—45.

9. Макеев А. Б., Дудар В. А., Лютоев В. П., Деревянко И. В., Глухов Ю. В., Исаенко С. И., Филиппов В. Н. Алмазы Среднего Тимана. Сыктывкар: Геопринт, 1999. 80 с.

10. Макеев А. Б., Дудар В. А. Минералогия алмазов Тимана. СПб.: Наука, 2001. 336 с.

11. Макеев А. Б., Лебедев В. А., Брянчанинова Н. И. Магматиты Среднего Тимана. Екатеринбург, 2008. 348 с.

12. Макеев А. Б. Минералогия альпинотипных ультрабазитов Урала. СПб.: Наука, 1992. 197 с.

13. Мальков Б. А., Холопова Е. Б. Трубки взрыва и алмазоносные россыпи Среднего Тимана. Сыктывкар: Геопринт, 1995. 49 с.

14. Недосекова И. Л., Удортатина О. В., Владыкин Н. В., Прибавкин С. В., Гуляева Т. Я. Петрохимия и геохимия дайковых ультрабазитов и карбонатитов Четласского комплекса (Средний Тиман): Ежегодник-2010, Труды ИГТ УрО РАН, 2011. Вып. 158. С. 122—130.

15. Никулова Н. Ю., Бурцев И. Н., Макеев Б. А., Филиппов В. Н. Хромшпинелиды из щелочно-ультраосновных пород Среднего Тимана // Геология и минеральные ресурсы Европейского Северо-Востока России: Материалы XVII Геол. съезда Республики Коми. 2019. Т. III. С. 222—225.

16. Павлов Н. В. Химический состав хромшпинелидов в связи с петрографическим составом пород ультраосновных интрузивов // Труды института геологических наук. Серия рудных месторождений, 1949. Вып. 103 (13). 88 с.

17. Тиманский кряж: В 2 т. / Ред.-сост.: Л. П. Шилов, А. М. Плякин, В. И. Алексеев. Т. 2. Литология и стратиграфия, геофизическая характеристика земной коры, тектоника, минерально-сырьевые ресурсы. Ухта: УГТУ, 2010. 437 с.

18. Шайбеков Р. И., Кузнецов С. К., Гайкович М. М., Шевчук С. С. Сульфидная и благороднометалльная минерализация в хромовых рудах Лагортинско-Кершорской площади Войкаро-Сыньинского массива (Полярный Урал) // Литосфера. 2015. № 1. С. 75—85.

19. Barnes S. J., Roeder P. L. The Range of Spinel Compositions in Terrestrial Mafic and Ultramafic Rocks // Journal of Petrology, 2001. V. 42. No. 12. P. 2279—2302. DOI: 10.1093/petrology/42.12.2279

20. Kamenetsky V. S., Crawford A. J., Meffre S. Factors Controlling Chemistry of Magmatic Spinel: an Empirical Study of Associated Olivine, Cr-spinel and Melt Inclusions from Primitive Rocks // Journal of Petrology, 2001. Vol. 42. No. 4. P. 655—671. DOI: 10.1093/petrology/42.4.655

21. Roeder P. L., Schulze D. J. Crystallization of Groundmass Spinel in Kimberlite // Journal of Petrology, 2008. Vol. 49. No. 8. P. 1473—1495. DOI:10.1093/petrology/egn034

References

1. Bogatikov O. A., Garanin V. K., Kononova V. A., Kudryavtseva G. P., Vasil'eva E. R., Verzhak V. V., Verichev E. M.



Parsadanyan K. S., Posukhova T. V. Arkhangel'skaya almazonosnaya provintsiya (geologiya, petrographiya, geokhimiya i mineralogiya) (Arkhangelsk diamondiferous province (geology, petrography, geochemistry and mineralogy)). Ed. O. A. Bogatkov. Moscow: Moscow State University Publ., 1999, 524 p.

2. Bulakh A. G., Zolotarev A. A., Krivovichev V. G. Struktura, izomorfizm, formuly, klassifikatsiya mineralov (Structures, isomorphism, formulas, classification of minerals). St. Petersburg: St. Petersburg University Press, 2014, 133 p.

3. Glukhov Yu. V., Makeev B. A., Varlamov D. A., Shevchuk S. S., Filippov V. N. Genetiko-informativnaya znachimost hromshpinelidov Srednevyvozhskego zolotonosnogo rossyeproyavleniya (Srednij Timan) (The genetically informative significance of chromespinelids of the Srednevyvozhske gold-bearing placer occurrence (Middle Timan)). Proceedings of conference «Modern problems of theoretical, experimental and applied mineralogy (Yushkin Readings — 2016)», Syktyvkar, Institute of geology Komi SC UB RAS, 2016, pp. 32–33.

4. Glukhov Yu. V., Makeev B. A., Varlamov D. A., Shevchuk S. S., Isaenko S. I. Hromshpinelidy s tsinksoderzhashchimi ehpi-geneticheskimi kajmami iz devonskih konglobrekchievyh gorizontov rossyeproyavleniya Ichet'yu (Srednij Timan) (Chromespinelides with zinc-bearing epigene rims from Devonian conglobreccia horizons of Ichet'yu placer-like occurrence (Middle Timan)). Litosfera, 2015, No. 2, pp. 103–120.

5. Glukhov Yu. V., Makeev B. A., Sokerin M. Yu. Tipomorfizm glubinnikh aktsessornykh mineralov Vymskoy gorstovoy struktury (Srednij Timan). Olivin, piropy (Typomorphism of hypogene accessory minerals of the Vymsky Horst structure (Middle Timan). Olivine, pyropes). Vestnik of Geosciences, 2020, 10(310), pp. 3–11. DOI: 10.19110/geov.2020.10.1.

6. Golubeva I. I., Mokrushin A. V., Philippov V. N., Burtsev I. N. Hromshpinelidy flyuido-eksplozivnykh daek Srednego Timana (Chromespinelides of fluid-explosive dykes of the Middle Timan), Proceedings of Fersman Scientific Session of Geol. Inst. Karelian SC. RAS, 2020, No. 17, pp. 117–127.

7. Golubeva I. I., Remizov D. N., Burtsev I. N., Filippov V. N., Shuyskiy A. S. Flyuidoeksplozivnye ultramafity dajkovogo kompleksa Srednego Timana i ih parageneticheskaya svyaz s karbonatitami (Fluid-explosion ultramafic rocks of the Middle Timan dyke complex and their paragenetic association with carbonatite). Regional Geology and Metallogeny, 2019. No. 80, pp. 30–44.

8. Kuznetsov N. B., Soboleva A. A., Udoratina O. V., Hertseva M. V., Andreichev V. L., Dorokhov N. S. Douralskaya tektonicheskaya evolyuciya severo-vostochnogo i vostochnogo obramleniya Vostochno-Evropejskoj platformy. Chast 2. Pozdneedokembrijsko-kembrijskaya kolliziya Baltiki i Arktidy (Pre-Uralian tectonic evolution of the North-East and East frame of the East European craton. Part 2. Neo-Proterozoic-Cambrian Baltica-Arctida collision). Litosfera, 2007, No. 1, pp. 32–45.

9. Makeev A. B., Dudar V. A., Lyutoev V. P., Derevyanko I. V., Glukhov Yu. V., Isaenko S. I., Filippov V. N. Almazы Srednego Timana (Diamonds from the Middle Timan). Syktyvkar, Geoprint Publ., 1999, 80 p.

10. Makeyev A. B., Dudar V. A. Mineralogiya almazov Timana (Diamond Mineralogy of the Timan). St. Petersburg: Nauka, 2001, 336 p.

11. Makeev A. B., Lebedev V. A., Bryanchaninova N. I. Magmatity Srednego Timana (Magmatites of the Middle Timan). Ekaterinburg. 2008, 348 p.

12. Makeev A. B. Mineralogiya alpinotipnykh ultrabazitov Urala (Mineralogy of Alpine Ultrabasic Rocks of Urals). St. Petersburg: Nauka, 1992, 197 p.

13. Malkov B. A., Kholopova E. B. Trubki vzryva i almazonosnye rossypi Srednego Timana (Explosion pipes and diamond-bearing placers of the Middle Timan). Syktyvkar: Geoprint, 1995, 49 p.

14. Nedosekova I. L., Udoratina O. V., Vladykin N. V., Pribavkin S. V., Gulyaeva T. Ya. Petrokhimiya i geokhimiya dajkovykh ultrabazitov i karbonatitov Chetlaskogo kompleksa (Srednij Timan) (Petrochemistry and geochemistry of ultramafic dyke and carbonatite Chetlas complex (Middle Timan), Yearbook-2010 of Institute of geology and geochemistry UB RAS, 2011, 158, pp. 122–130.

15. Nikulova N. Yu., Burtsev I. N., Makeev B. A., Filippov V. N. Hromshpinelidy iz shchelochno-ultraosnovnykh porod Srednego Timana (Chromespinelides from alkaline-ultrabasic rocks of the Middle Timan). Geologiya i mineralnye resursy Evropejskogo Severo-Vostoka Rossii (Geology and mineral resources of the European North-East of Russia), proc. of XVII Geol. Congress of Komi Republic, Apr. 16–18, 2019, V. III, pp. 222–225.

16. Pavlov N. V. Himicheskij sostav hromshpinelidov v svyazi s petrograficheskim sostavom porod ultraosnovnykh intruzivov (Chemical composition of chrome-spinels in view of the petrographic composition of the rocks of the ultrabasic intrusions). Proceedings of the Institute of Geological Sciences. Ore deposits series, 1949, 103(13), 88 p.

17. Timanskiy kryazh (Timan ridge). Compiling editors: L. P. Shilov, A. M. Plyakin, V. I. Alekseev. Vol. 2. Litologiya i stratigrafiya, geofizicheskaya kharakteristika Zemnoy kory, tektonika, mineralno-syrevye resursy (Lithology and stratigraphy, geophysical characteristics of the Earth's crust, tectonics, mineral and raw material resources). Monography. Ukhta, Ukhta State Techn. Univ., 2010, 437 p.

18. Shaybekov R. I., Kuznetsov S. K., Gaikovich M. M., Shevchuk S. S. Sulfidnaya i blagorodnometalnaya mineralizatsiya v khromovykh rudakh Lagortinsko-Kershorskoy ploshchadi Voykaro-Syninskogo massiva (Polyarnyy Ural) (Sulfide and noble metals mineralization in chromium ores of Lagorta-Kershore area, Voikar-Synya massif (Polar Urals)). Litosfera, 2015, No. 1, pp. 75–85.

19. Barnes S. J., Roeder P. L. The Range of Spinel Compositions in Terrestrial Mafic and Ultramafic Rocks. Journal of Petrology, 2001, V. 42, No. 12, pp. 2279–2302. DOI: 10.1093/petrology/42.12.2279

20. Kamenetsky V. S., Crawford A. J., Meffre S. Factors Controlling Chemistry of Magmatic Spinel: an Empirical Study of Associated Olivine, Cr-spinel and Melt Inclusions from Primitive Rocks. Journal of Petrology, 2001, V. 42, No. 4, pp. 655–671. DOI: 10.1093/petrology/42.4.655

21. Roeder P. L., Schulze D. J. Crystallization of Groundmass Spinel in Kimberlite. Journal of Petrology, 2008, V. 49, No. 8, pp. 1473–1495. DOI:10.1093/petrology/egn034

Received / Поступила в редакцию 08.10.2020

Нано- и микроморфологические доказательства коллоидной структуры содержимого включений кольцевых силикатных кристаллов

Н. Н. Пискунова, А. А. Кряжев

Институт геологии ФИЦ Коми НЦ УрО РАН, Сыктывкар
piskunova@geo.komisc.ru

Методами сканирующей атомно-силовой (АСМ) и электронной микроскопии (СЭМ) изучено вещество, выделяемое естественным образом при механическом вскрытии ростовых включений кристаллов аквамарина, берилла и шерла (Забайкалье). Жидкая часть вещества включений представляет собой достаточно концентрированную коллоидную золь-гель-силикатную систему. Растекающийся силикатный коллоид образует пленку, плохо удаляемую с поверхности скола, которая надежно регистрируется с помощью АСМ и трансформируется под длительным воздействием электронного пучка в пеностекло. Последний факт можно использовать для создания устойчивых при нормальных условиях субмикронных текстур методом электронно-лучевой литографии. Исследование кварца и фенакита (Урал) не обнаружило подобных пленок. В отличие от аквамарина, внутренние стенки полостей включений кварца и фенакита, по данным АСМ, покрыты холмиками роста, выросшими по дислокационному механизму. Все это указывает на сравнительно невысокую степень полимеризации силикатного компонента в исходном гидротермальном маточном растворе для кварца и фенакита по сравнению со степенью полимеризации в средах минералообразования кольцевых силикатных кристаллов.

Ключевые слова: атомно-силовая микроскопия, флюидные включения, золь-гель, пеностекло, Шерловая гора.

Nano- and micromorphological evidences of the colloidal structure of ring silicate crystal inclusions

N. N. Piskunova, A. A. Kryazhev

Institute of Geology FRC Komi SC UB RAS, Syktывkar

The substance released naturally during mechanical opening of growth inclusions of aquamarine, beryl and tourmaline crystals (Transbaikalia, Russia) has been studied by scanning atomic force microscopy (AFM) and electron microscopy (SEM). The liquid part of the substance of the inclusions is a sufficiently concentrated colloidal sol-gel-silicate system. The diffused silicate colloid forms a film, poorly removable from the chip surface, which is reliably detected by AFM and transformed under prolonged exposure to an electron beam into a foam-glass. The latter fact can be used to create sub-micron textures that are stable under normal conditions by electron-beam lithography. The study of quartz and phenacite (Ural, Russia) did not reveal such films. In contrast to aquamarine, the inner walls of cavities of quartz and phenacite inclusions, according to AFM data, are covered with growth hills, grown by the dislocation mechanism. This indicates a relatively low degree of polymerization of the silicate component in the initial hydrothermal mother liquor for quartz and phenacite compared to the degree of polymerization in the mineral-forming media of ring silicate crystals.

Keywords: atomic force microscopy, fluid inclusions, sol-gel, foam-glass, Sherlovaya Mountain.

Введение

Ростовые включения являются уникальным источником информации о процессах формирования кристаллов в природе. Сведения о структуре и составе содержимого включений являются важной частью этой информации, они необходимы для уточнения состава среды кристаллизации и его агрегатного состояния. В литературе широко обсуждается возможность участия коллоидных сред в гидротермально-пневматолитовых процессах. В работах Прокофьева с соавторами показано, что флюидные включения в халцедоне из прожилков в базальтах (м. Гончак, Нижняя Тунгуска, Ср. Сибирь) представляют собой золь кремниевой кислоты [6, 10, 23, 24]. С. З. Смирнов при изу-

чении включений в редкометалльных гранитах и микролитовых гранитных пегматитах Центрального Забайкалья показал, что их формирование могло протекать в водно-силикатной жидкости, имеющей консистенцию коллоидных растворов-гелей и обладающей способностью к экстремальному концентрированию редких литофильных элементов и фтора [11, 25]. В экспериментальных работах отмечается, что в высокотемпературных гидротермальных средах в силикатных системах с натрием благодаря высокой растворимости кремнезема происходит образование вязкой жидкости, которую от расплава отличает очень высокое содержание воды, а от водного раствора — большое количество SiO_2 [2, 3, 6, 16–18]. Эту вязкую жид-

Для цитирования: Пискунова Н. Н., Кряжев А. А. Нано- и микроморфологические доказательства коллоидной структуры содержимого включений кольцевых силикатных кристаллов // Вестник геонаук. 2021. 8(320). С. 16–26. DOI: 10.19110/geov.2021.8.2.

For citation: Piskunova N. N., Kryazhev A. A. Nano- and micromorphological evidences of the colloidal structure of ring silicate crystal inclusions. Vestnik of Geosciences, 2021, 8(320). pp. 16–26. doi: 10.19110/geov.2021.8.2.



кость называют водно-силикатной жидкостью, «тяжелым флюидом», иногда студнем.

Присоединение к таким методам изучения состава включений, как сканирующая электронная микроскопия (СЭМ) и КР-спектроскопия, высокоразрешающей зондовой микроскопии, существенно облегчило морфолого-генетическую интерпретацию условий роста кристаллов. Атомно-силовая микроскопия (АСМ) позволила получить изображения ростовых поверхностей и поверхностей свежих сколов на наноуровне, исследовать рельеф внутренних стенок включений [7, 22].

В настоящей работе АСМ использовался для доказательства присутствия на поверхностях свежих сколов некоторых кристаллов пленок из силикатного вещества, выделившегося естественным образом из включений. С помощью электронно-лучевой литографии мы предполагали провести эксперименты по трансформации таких пленок под электронным лучом с целью подтверждения или неподтверждения их коллоидной структуры. АСМ-изучение тонкого рельефа внутренних стенок включений помогло бы определить механизмы постростовых преобразований внутри включений различных кристаллов. Основной целью работы было сравнение результатов для кварца, фенакита и алюмосиликатов с результатами для кольцевых силикатных структур (аквамарин, берилл и шерл).

Объекты изучения

Основными объектами изучения являлись кристаллы аквамарина (Шерловая гора, Забайкалье), горного хрусталя (м. Желанное, Приполярный Урал) и фенакита (Уральские изумрудные копи). Выводы работы проверены на кристаллах аметиста (м. Хасаварка, Приполярный Урал), берилла и шерла (Шерловая гора, Забайкалье), а также рубеллита (гора Манхай, Забайкалье).

Грейзен Шерловой горы считают результатом пневматолитового изменения гранита под влиянием поднимавшихся по трещинам газов и летучих соединений. Генетически связанные с магмой самого гранита и богатые такими минерализаторами, как W, F, B, Be, As и др., они дали начало образованию на Шерловой горе разных минералов, в том числе берилла и его разновидности, аквамарина, окрашенного примесями железа в голубой цвет [14, 15]. Берилл $\text{Be}_3\text{Al}_2[\text{Si}_6\text{O}_{18}]$ принадлежит к кольцевым силикатам. Основой кристаллической структуры берилла являются параллельные кольца $[\text{Si}_6\text{O}_{18}]$, повернутые относительно друг друга и скрепленные в единый каркас катионами Be^{2+} и Al^{3+} , соответственно находящимися в тетраэдрической и октаэдрической позициях. В структуре берилла есть полые каналы диаметром до $5\text{\AA}$, которые могут быть заняты примесями, а также молекулами воды и инертными газами.

Алюмоборосиликат турмалин $\text{Na}(\text{Mg}, \text{Fe}^{2+}, \text{Mn}, \text{Li}, \text{Al}, \text{Fe}^{3+})_3\text{Al}_6\{(\text{BO}_3)_3[\text{Si}_6\text{O}_{18}](\text{OH}, \text{F})_4\}$ также имеет кольцевое строение. Правая часть формулы соответствует алюмоборокислородному радикалу, который в кристаллической структуре минерала образует изолированные двухслойные кольца. Левая часть формулы представлена ионами натрия (иногда и кальция), которые находятся в кристаллической решетке в шестерной координации кислорода и связывают кольцевые радикалы друг с другом по оси c . В централь-

ную часть формулы входят катионы, содержание которых подвержено резким колебаниям. По наличию в кристаллической решетке натрия и двухвалентного железа различают шерл, а двухвалентного марганца — рубеллит.

Кварц SiO_2 относится к каркасным силикатам, его решетка построена из кремнекислородных тетраэдров, расположенных винтообразно (с правым или левым ходом винта) по отношению к главной оси кристалла.

Аметист — разновидность кварца фиолетового цвета, который обусловлен структурной примесью Fe.

Фенакит — островной силикат состава $\text{Be}_2[\text{SiO}_4]$. В основе его структуры лежат тригональные призмы, состоящие из трех сцепленных вершинами цепочек, в каждой из которых два бериллийкислородных тетраэдра $[\text{BeO}_4]$ чередуются с тетраэдром $[\text{SiO}_4]$, при этом последний располагается по спирали в призмах.

Кварц, аметист и фенакит кристаллизуются в тригональной сингонии. Месторождения, к которым относятся конкретные кристаллы кварца, аметиста и фенакита — Желанное, Хасаварка и Мариинское — характеризуются исследователями как гидротермальные [1, 4, 8].

Методика

В работе использовался атомно-силовой микроскоп Ntegra Prima (NT-MDT, Россия) и стандартные кремниевые кантилеверы (NanoProbe, Великобритания) с радиусом закругления кончика 5 нм. Исследования проводились при комнатной температуре ($20 \pm 2^\circ\text{C}$), частично в контактном, частично в бесконтактном режимах, а также в режиме фазового контраста. В основе методики фазового контраста АСМ лежит регистрация амплитуды и сдвига фазы резонансных колебаний зонда при его взаимодействии с поверхностью [20]. Как показали наши исследования, такое изменение свойств исследуемого образца может указывать на включения или пленки, имеющие меньшую или большую, чем основной образец, плотность, которые при обычном режиме съемки теряются на фоне общего топографического изображения.

Для АСМ-исследований кристаллы разрезались и полировались алмазной суспензией с размером зерен порядка 1 мкм. Для очистки образцов от солей и обломков проводилось их выдерживание в ультразвуковой ванне с водой. Вязкие пленки, которые мешали АСМ-сканированию, смывались, таким образом, водой, иногда с ацетоном, однако эффективным оказалось только механическое протирание поверхности безворсовой салфеткой.

Элементный анализ производился энергодисперсионным детектором X-Мах (площадь 50 мм^2) (Oxford Diffraction, Великобритания) сканирующего электронного микроскопа Tescan Vega 3 (Чехия). Съемка изображений проводилась в режимах SE и BSE. В процессе работы с СЭМ каждый исследователь сталкивался с тем, что поверхность образца иногда меняется под электронным лучом. Характер воздействия зависит от структуры и состава минерала или материала, чаще всего это испарение вещества с уменьшением объема (образованием ямки) и визуальным потемнением области под лучом. В ходе нашей работы в некоторых случаях воздействие луча на кристалл приводило к об-

ратному эффекту — возникновению фигуры увеличенного объема. Мы использовали данный факт для экспериментов по модификации поверхности, предположив, что этот эффект — результат трансформации несмываемой пленки наноразмерной толщины, находящейся на поверхности кристалла.

Для модификации поверхности производилась фокусировка пучка в одну «точку» (диаметр пучка 190 нм, ускоряющее напряжение 20 кВ), но при этом незначительно, по сравнению со стандартной методикой элементного анализа, увеличивались время воздействия и интенсивность пучка. Чаще всего в наших экспериментах возникновение субмикронных фигур происходило после обычных программных 3 минут воздействия в одной точке; если этого было недостаточно, время увеличивалось вдвое. Использовались два типа напыления — углеродом и золотом. В отличие от подготовки кристаллов для АСМ, перед исследованием в СЭМ кристаллы берилла, аквамарина, шерла, рубеллита, кварца, аметиста и фенакита не подвергались никаким воздействиям, только разламывались непосредственно перед напылением. Это необходимо для исключения контакта с водой, чтобы убедиться в нетехногенном происхождении пленок.

Для диагностики минерального состава проводилось исследование образцов методом КР-спектроскопии при возбуждении лазерами видимого диапазона на высоко-разрешающем рамановском спектрометре LabRam HR800 (Horiba Jobin Yvon). Использовался He-Ne-лазер ($\lambda = 633$ нм, мощность при регистрации КР-спектров составляла 2–20 мВт) и Ar⁺-лазер ($\lambda = 515$ нм).

Результаты и их обсуждение

Исследование кристаллов аквамарина методом КР-спектроскопии показало присутствие полосы 3609,

что соответствует воде так называемого II типа в структурных каналах аквамарина, когда из-за насыщенности щелочными ионами молекулы воды ориентируются определенным образом [19]. Фокусировка лазера внутри включений и трещин дает одинаковый спектр (рис. 1), лишь иногда с присутствием дополнительных минералов вроде рутила. Как видно на спектре, во включениях также достаточно структурно не связанной воды. Элементный анализ в области вскрытых включений показал незначительные количества натрия, магния и титана.

С помощью атомно-силовой микроскопии на аквамарине нами были обнаружены ровные полосы шириной от 40 до 200 нм, приподнятые на всем своем протяжении на высоту около 3 нм над поверхностью (рис. 2, б). Их схожесть со следами царапин указывала на техногенное происхождение, в режиме фазового контраста АСМ эти полосы показали меньшую, чем окружающая поверхность, плотность. Элементный анализ с помощью СЭМ на этих полосах приведен на рисунке 2, а. Такие же полосы обнаружены нами на полированных срезах рубеллита и шерла.

Кроме этого, в режиме фазового контраста АСМ на всех поперечных срезах аквамарина были обнаружены пленки, имеющие плотность меньше окружающей поверхности: на рисунке 3 они имеют самый темный цвет. Пленка на поверхности — результат вытекания содержимого включений, и, учитывая, что эта пленка вязкая, трудносмываемая, а также результаты АСМ и элементного анализа, мы предполагаем, что жидкая часть включений аквамарина представляет собой золь (гель). При резке и разламывании, а также при применении ультразвука, он выдавился из включений, образовав на поверхности наноразмерную пленку. Помимо адсорбции и установления вандерваальсовых связей, между такой пленкой и подложкой-кристаллом воз-

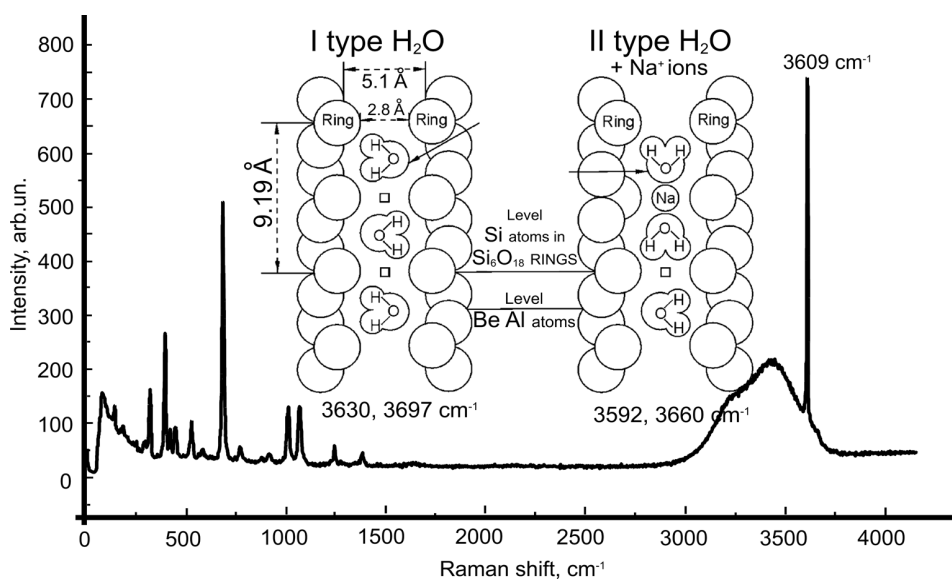


Рис. 1. КР-спектр включения аквамарина, содержащий структурно несвязанную воду (3100–3700 см⁻¹) и полосу 3609 см⁻¹, которая соответствует воде II типа (на вклейке — схема [19]) в структурных каналах аквамарина, интенсивность которой указывает на большое количество щелочных ионов в этих каналах

Fig. 1. Raman spectrum of aquamarine inclusion containing unbound water (3100–3700 cm⁻¹) and the 3609 cm⁻¹ band, which corresponds to type II water in the structural channels of aquamarine (inset — scheme from [19]), which intensity indicates a large number of alkaline ions in these channels

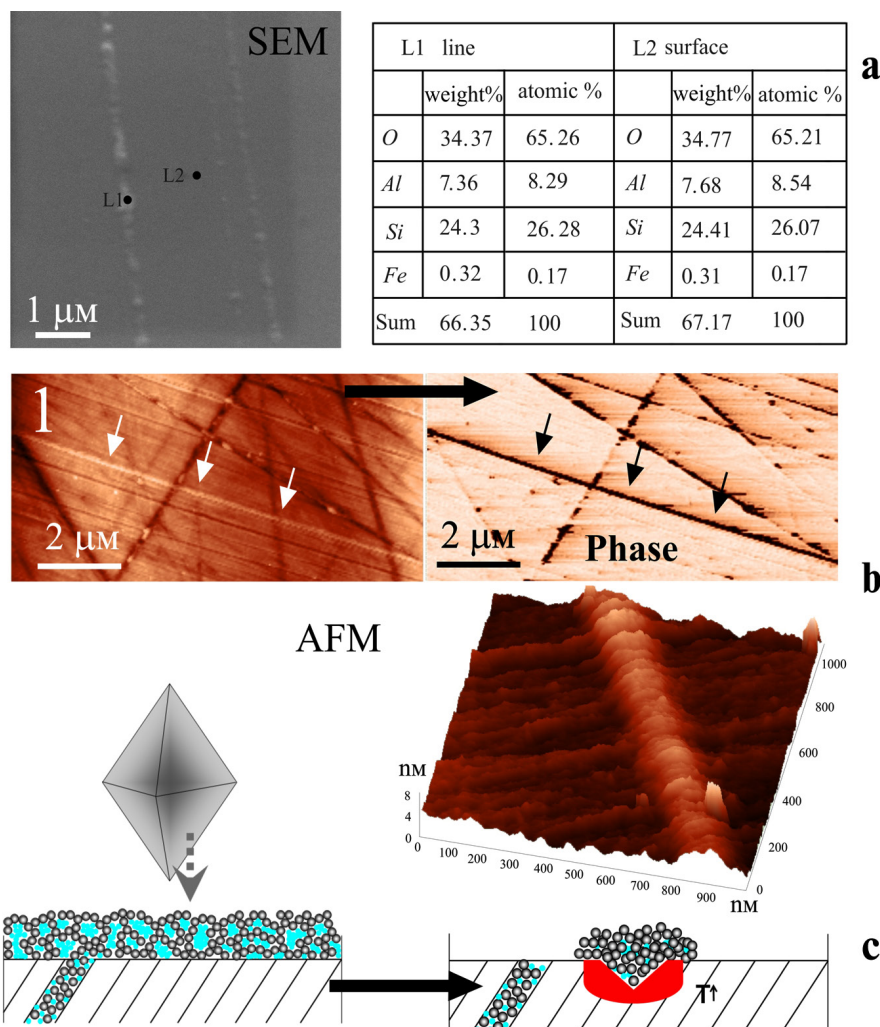


Рис. 2. Полосы шириной 40–200 нм и высотой ~3 нм на полированной поверхности аквамарина, обнаруженные с помощью СЭМ (а) и АСМ (б). Для СЭМ приведен элементный анализ в двух точках, для АСМ приведено изображение в режиме фазового контраста, показывающее, что полоса мягче окружающей поверхности. Внизу — схема, объясняющая механизм образования прижога при полировании аквамарина, имеющего коллоидную пленку на поверхности (с)

Fig. 2. Bands 40–200 nm wide and ~3 nm high on the polished aquamarine surface detected by SEM (a) and AFM (b). For SEM the elemental analysis in two points is given, for AFM the image in phase contrast mode is given, showing that the band is softer than the surrounding surface. Below is a schematic explaining the mechanism of burn — in formation when polishing aquamarine which has a colloidal film on the surface (c)

никают химические связи. На поверхности начинается превращение золя в гель и дальнейшее упрочнение геля. Тогда полосы на рисунке 2, б — это прижоги от полирования, на которых, вероятнее всего, из-за локального повышения температуры произошла дегидратация и уплотнение геля с уменьшением пор. Образовался ксерогель, который декорировал участки усиленного трения абразива о поверхность.

Кристаллы аквамарина в нашем эксперименте разрезались перпендикулярно оси *c*, и после применения ультразвука в оптическом микроскопе мы обнаружили на его срезе вязкие капли (рис. 4). Они вытекли из вскрытых длинных каналов — трубчатых включений, визуальнo видных на просвет, которые, как известно, формируются в берилле и аквамарине параллельно оси *c* [27]. Эти включения образуются благодаря сильной анизотропии скорости роста граней с преобладанием роста пинакоида. Мы считаем, что их содержимое в настоящее время имеет коллоидную структуру. Захваченный в кристалл многокомпонент-

ный флюид мог изначально иметь коллоидное строение, точно так же, как могла произойти трансформация в коллоид уже внутри полости включения, при выходе из режима роста с понижением температуры, а также при последующей длительной экспозиции при различных РТ-условиях. Современные события, такие как сброс давления от механического вскрытия включения, взаимодействие с атмосферой и т. д., также могли, хотя и с меньшей вероятностью, спровоцировать такую трансформацию.

Если вывод о коллоидном содержимом включений в аквамарине верен, то его поверхность должна проявлять необычные свойства и под электронным пучком. Действительно, при воздействии на ту часть среза аквамарина, где с помощью СЭМ определялись пленки, сфокусированным электронным пучком слегка увеличенной интенсивности произошло формирование объемной ровной фигуры с диаметром чуть больше диаметра пучка (200–250 нм). На свежесформированной из трещины вязком растворе под лучом также об-

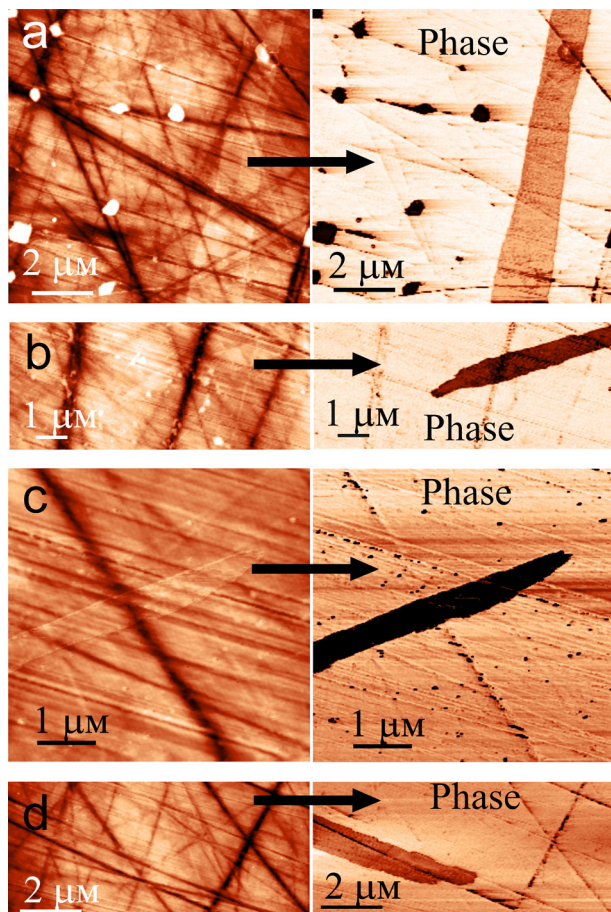


Рис. 3. АСМ-изображения различных полированных участков аквамарина — а, b, c, d. Каждое изображение продублировано снимком в режиме фазового контраста (Phase), который позволил обнаружить темные пленки меньшей, чем окружающая поверхность, плотности (высота пленок 3–5 нм)

Fig. 3. AFM-images of different polished areas of aquamarine — a, b, c, d. Each image was duplicated by an image in the phase contrast mode, which allowed detecting dark films with a density lower than the surrounding surface (the height of the films is 3–5 nm)

разовалась округлая фигура (диаметр ~200 нм, время воздействия 3 минуты). При фокусировке луча на участке поверхности без явно видимых с помощью СЭМ пленок также «выросла» полусфера, однако ее диаметр оказался значительно больше — 400–450 нм. Таким образом, толщина пленки имеет огромное значение для формирования фигур, ведь в последнем случае на поверхности очевидно присутствует наноразмерная гелевая пленка, которую СЭМ не может отобразить. В режиме BSE отличий образованных фигур от окружающей поверхности не обнаружено, все различия только морфологические.

Описанный эффект проявляется только при напылении поверхности углеродом и не проявляется при напылении ее золотом. Точно такие же субмикронные фигуры вырастают от воздействия луча на кристаллах берилла и шерла, а также рубеллита (рис. 5).

Формирование похожих фигур встречалось нам в работах [21, 26], в которых приводятся результаты электронно-лучевой литографии с использованием в качестве резиста силикатного золь-геля. В качестве характеристики протекающего физического процесса в работе [26] называется «конденсация золя с образованием жестких силоксановых связей через кислотно-катализируемый процесс под воздействием тепла, выделяемого электронным пучком». Авторы считают, что в результате получается кварцевое стекло. В работе [21] авторы рисуют наноструктуры электронным лучом, считая, что происходит «шаблонное твердотельное осушение» силикатной золь-гель-пленки с формированием ксерогеля.

Так как в этих работах воздействие на гель производилось через прорезы маски с последующим растворением остальных частей гелевой пленки, то авторов не удивило увеличение объема, а не его уменьшение, как должно быть в случае преобразования геля в ксерогель.

В наших экспериментах при формировании объемных фигур на аквамарине под воздействием электронного пучка происходит все же не упрочнение геля, а вспенивание гелевой пленки в локальной обла-

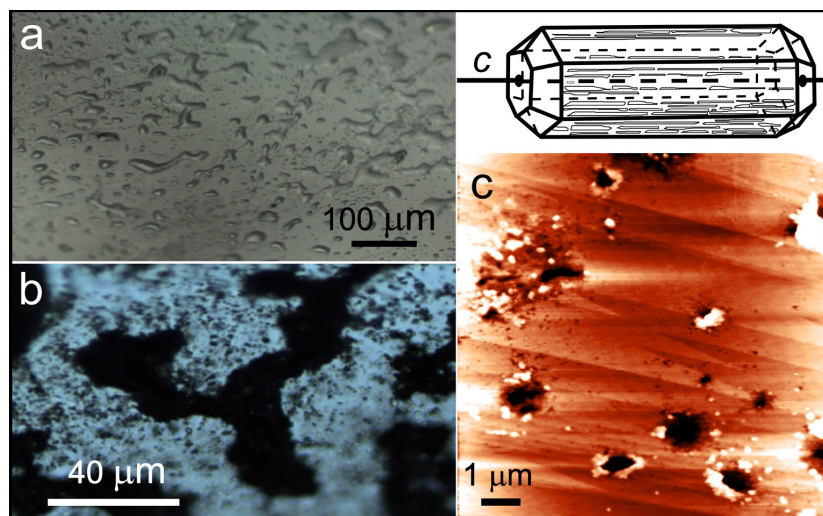


Рис. 4. Разрез аквамарина перпендикулярно оси с и выделившееся содержимое вскрытых включений: а — снимок на отражение, b — на просвет, c — АСМ-изображение (темные участки — вскрытые включения)

Fig. 4. Cut of aquamarine perpendicular to the c-axis and the extracted contents of the dissected inclusions: a — image in reflection, b — on the light, c — AFM-image (dark areas are exposed inclusions)

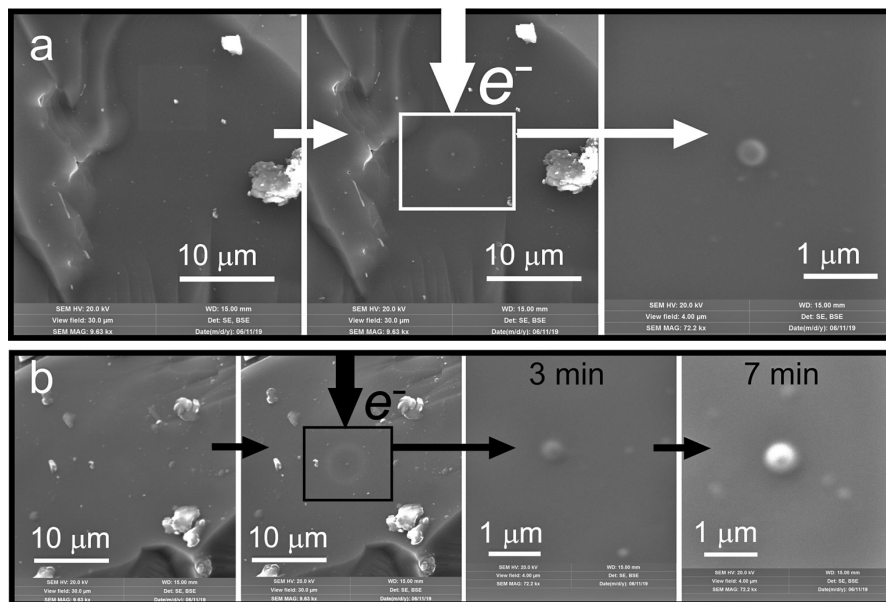


Рис. 5. Формирование полусферы под действием сфокусированного электронного пучка на сколах кристаллов: а — рубеллита, б — шерла. Увеличение времени воздействия привело к увеличению диаметра фигуры с 410 нм до 620 нм

Fig. 5. Formation of hemisphere under the action of focused electron beam on crystal chips: a — rubellite, b — sherl. Increase of exposure time led to increase of diameter of the figure from 410 nm to 620 nm

сти. Фигуры представляют собой вспененное стеклообразное вещество (пеностекло), достаточно устойчивое в нормальных условиях. Существуют методики обработки жидкого стекла, при которых температуры 150 °С хватает для его вспенивания [5]. Сильное нагревание электронным пучком локального участка поверхности становится возможным из-за гелевой пленки, слабо отводящей тепло, наличия диэлектрической подложки, а также углеродного напыления, которое по сравнению с золотым напылением так же слабо отводит тепло. Вакуумирование значительно снижает температуру для начала парообразования и делает процесс объемным. На рисунке 6 приведена примерная схема описываемого процесса, а также результат специального воздействия сфокусированного электронного пучка по заданной траектории, когда на поверхности кристалла аквамарина появилась объемная надпись «ЭМ». Это заняло примерно 2.5 часа при воздействии в каждой точке в течение трех минут, диаметре пучка 190 нм, ускоряющем напряжении 20 кВ и увеличенной по сравнению со стандартной методикой элементного анализа интенсивности пучка. Искажение первоначальных заданных очертаний букв и их смещение произошло из-за дрейфа объектодержателя в течение эксперимента. Уширение в начале буквы «Э» указывает на эффекты длительного «остывания», место наложения двух букв демонстрирует результат сложного термического воздействия в одной точке (рис. 6).

В процессе формирования пеностекла должен участвовать порообразователь, который создаст при нагревании расклинивающее давление. Обычный раствор в таких условиях испарится, а силикатный золь (гель), содержит в своих порах молекулярную воду, которая может послужить таким порообразователем. Кроме нее в порах, как и в отдельных мицеллах золя, достигающих в диаметре 10 нм [13], содержатся сила-

нольные (и дисиланольные и связанные силанольные) ОН-группы. Таким образом, формирование вспененных субмикронных фигур под воздействием электронного луча может служить свидетельством того, что пленка, вытекающая из включений на поверхности аквамарина, представляет собой не истинный раствор, а золь (гель), в порах и отдельных мицеллах которого заключена вода.

Воздействие лучом на любой участок боковой (вырезанной параллельно оси с) поверхности аквамарина также приводит к формированию описываемых фигур. Таким образом, вытекшее содержимое включений формирует пленку на поверхности, которая не смывается до конца даже при механическом воздействии, а электронный луч вызывает появление на ней вспененной фигуры. На свежем неполированном разломе кристаллов толщина гелевой пленки больше, и для создания фигур похожего диаметра потребовалось увеличить вдвое время воздействия. Контроль размеров образовавшихся фигур показал, что в течение 3.5 часов после воздействия происходит увеличение диаметра фигуры на 50 нм, далее, через сутки, неделю и 16 дней не происходит никаких изменений как их диаметра, так и общего профиля. Таким образом доказывается, что остывшая фигура имеет жесткий каркас, что согласуется с предположением, что она представляет из себя пеностекло.

Воздействие электронного луча на кристаллы горного хрусталя и фенакита не привело к каким-либо изменениям их поверхности, несмотря на увеличение времени экспозиции. Нами установлено, что если специально покрыть скол горного хрусталя слоем силикатного геля, то под сфокусированным электронным лучом появляется объемная фигура.

Таким образом, в отличие от других силикатных кристаллов, для поверхности свежего разлома кристаллов кольцевой структуры характерно присутствие кол-

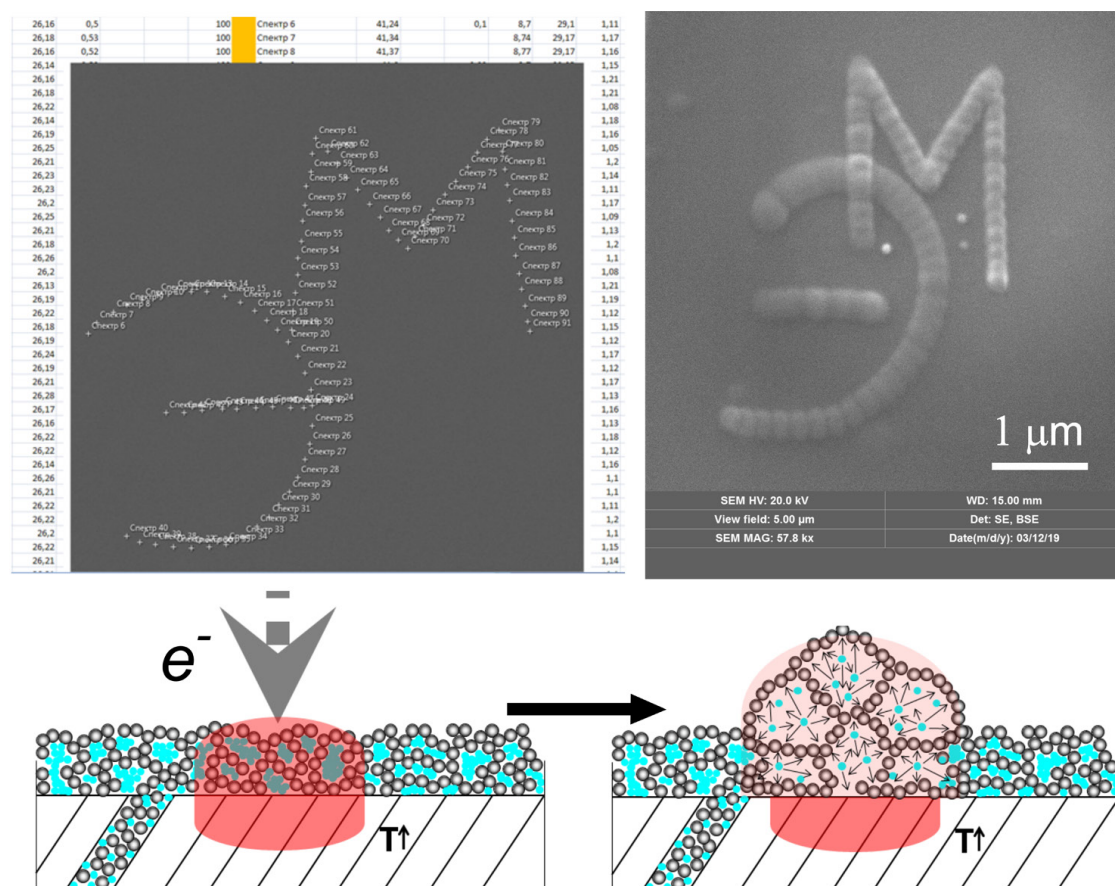


Рис. 6. Субмикронная фигура-рисунок на поверхности аквамарина как результат электронно-лучевой литографии. Аббревиатура «ЭМ» обозначает лабораторию экспериментальной минералогии Института геологии (Сыктывкар, Россия). Внизу — схема процесса вспенивания коллоидной пленки на кристалле аквамарина в области действия электронного пучка

Fig. 6. Sub-micron figure on the surface of an aquamarine as a result of electron-beam lithography. The abbreviation «ЭМ» stands for the Laboratory of Experimental Mineralogy of the Institute of Geology (Syktyvkar, Russia). Below — scheme of the foaming process of a colloidal film on an aquamarine crystal in the area of the electron beam

лоидной пленки — результата вытекания жидкой части содержимого их включений. Более высокая степень полимеризации кремнекислоты в изначальном маточном растворе для кольцевых силикатов означала бы в первую очередь разные механизмы построения поверхности. Аксессуары роста в наномасштабе должны различаться морфологически в зависимости от того, служили ли их строительными единицами мономеры, димеры, тримеры и т. д. Для проверки данного факта мы применили АСМ для изучения рельефа внутренних стенок включений кристаллов кварца, аметиста и фенакита с одной стороны и аквамарина — с другой.

Действительно, морфологическое сканирование на наноуровне с помощью АСМ полостей включений кристаллов простых тригональных силикатов показало присутствие на внутренних стенках их включений многочисленных холмиков роста, на вершине которых определяются спиральные ступени (рис. 7). Они несколько отличаются от холмиков на ростовой поверхности: имеют достаточно малый размер и необычную форму, а также плотное расположение. Тем не менее это зачатки конусовидных аксессуаров роста на поверхности базиса, которые являются классическими дислокационными холмиками роста, нарастающими

по известному механизму Франка. Согласно теории дислокационного роста, высокая плотность холмиков говорит о том, что на предыдущем этапе температура и давление претерпели значительный скачок, в результате которого произошла перестройка поверхности и возникло множество источников роста. При нормальном питании на свободной ростовой поверхности спустя какое-то время осталось бы лишь несколько крупных холмиков, однако не в закрытой полости включения. По форме холмики представляют собой широкие плосковерхушечные островки. Все дело в том, что при малых значениях пересыщения большая роль отводится примесям, блокирующим вращение ступени на вершине. В результате части спирали, прилегающие к вершине холма, начинают перемещаться медленнее периферийных и формируется плосковершинный холмик. Известно, что в области малых значений пересыщения зависимость его от скорости становится нелинейной, и этим объясняется немонотонность наклона для дислокационного холмика [9]. А. А. Черновым была предложена нелинейная теория, описывающая наблюдаемую немонотонность начиная с некоторого порогового пересыщения по отношению к действию примесей [12]. При этом размер примеси должен быть срав-

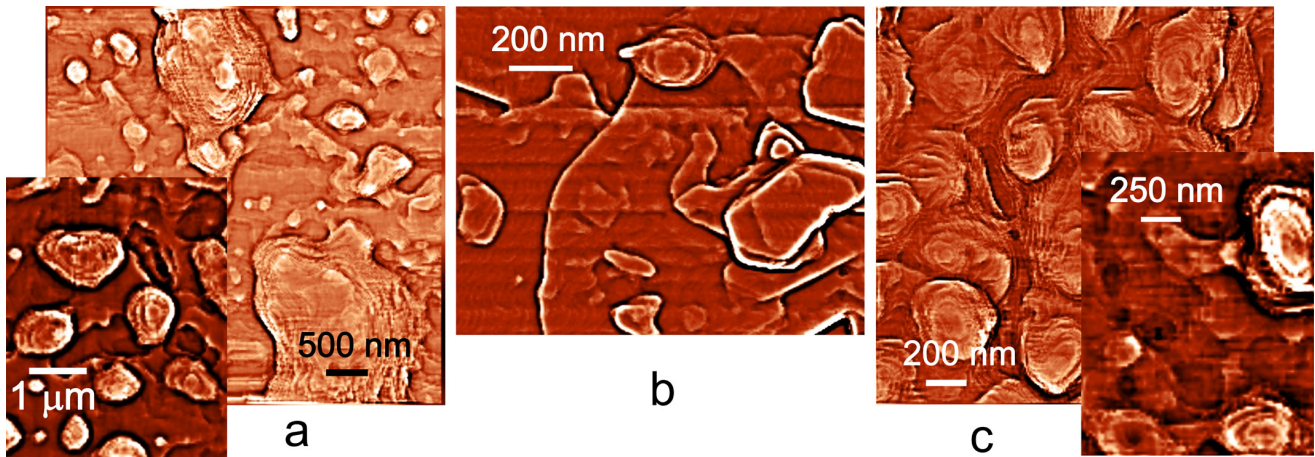


Рис. 7. АСМ-изображение спиральных холмиков на внутренних стенках включений: а — фенакита, б — аметиста, с — кварца

Fig. 7. AFM-images of the spiral hillocks on the inner walls of the inclusions: a — phenacite, b — amethyst, c — quartz

ним с размером излома на ступени, то есть составлять первые единицы ангстрем.

Если раствор перемешать, то есть увеличить пересыщение в области вершины, влияние примесей снимется и наклон вблизи выхода дислокации выровняется с наклоном вдали от нее. Однако перемешивания в полости включения произойти не могло. Таким образом, такая форма ростовых холмиков — плоские вершины, неразвитое подножье и крутые бока — свидетельствует о формировании дислокационных спиралей при очень малых значениях пересыщения, значительном влиянии ангстремного размера примесей на протяжении длительного времени и говорит о том, что они выросли после формирования включения из захваченного внутри него раствора. Высота ступеней на обнаруженных холмиках достаточно большая (до 20 нм), что также связано с влиянием примесей.

АСМ-исследование стенок включений в аквамари-не не обнаружило холмиков: на всех масштабах выявляется глобулярное строение поверхности (рис. 8). В отдельных случаях глобулы хорошо разделены и имеют почти одинаковый размер — около ста нанометров (рис. 8, с).

Таким образом, можно предположить, что раствор, захваченный в процессе роста силикатными кристаллами кольцевой структуры, имеет достаточно высокую степень полимеризации кремнекислоты. Возможно, первичные структурные цепочки, входящие затем в структуру этих минералов, формируются еще в исходных минералообразующих средах именно по причине полимеризованности компонентов этих сред. Поэтому на разломе кольцевых силикатных кристаллов отмечается присутствие значительных количеств силикатного вещества в форме пленок золя и геля. Простые тригональные силикаты кварц и фенакит растут преимущественно из неполимеризованных растворов кремниевой кислоты.

Выводы

С помощью атомно-силовой и сканирующей электронной микроскопии природных силикатных кри-

сталлов обнаружены неудаляемые пленки вещества, вытекшего естественным образом из ростовых включений кольцевых силикатных кристаллов, оставшиеся на поверхности включений и разломов. Электронно-лучевая литография позволила надежно установить явление вспенивания обнаруженных пленок с возможностью контролируемой модификации поверхности и образованием субмикронных фигур, достаточно устойчивых в нормальных условиях. Представляющие собой пеностекло, они доказывают, что порообразователем для них послужила вода, изначально заключенная в порах геля. Коллоидное строение пленок послужило также причиной образования прижогов на полированных поверхностях кольцевых силикатов, обнаруженных с помощью атомно-силовой микроскопии.

Наноморфологические различия в строении ростовых аксессуаров, обнаруженных при АСМ-сканировании внутренних стенок включений кристаллов кварца, аметиста и фенакита с одной стороны и аквамарины с другой стороны, также доказывают, что раствор, захваченный в процессе роста силикатными кристаллами кольцевой структуры, имеет достаточно высокую степень полимеризации кремнекислоты.

Авторы выражают огромную благодарность инженеру Виктору Александровичу Радаеву за организацию исследований на АСМ, к. г.-м. н. Оксане Владимировне Удуратиной и к. г.-м. н. Анатолию Германовичу Николаеву (Казанский федеральный университет) за предоставленные образцы. Работа проведена на базе ЦКП «Геонаука» (Сыктывкар) при частичной финансовой поддержке РФФИ № 19-05-00460.

Литература

1. Буканов В. В. Онтогенез аметиста и особенности его генезиса на примере месторождения Хасаварка (Приполярный Урал) // Геология, методы поисков, разведки и оценки месторождений ювелирных, поделочных и декоративно-облицовочных камней. М., 1975. С. 50—52.
2. Котельникова З. А., Котельников А. Р. Синтетические NaF-содержащие флюидные включения // Геохимия. 2002. № 6. С. 657—663.

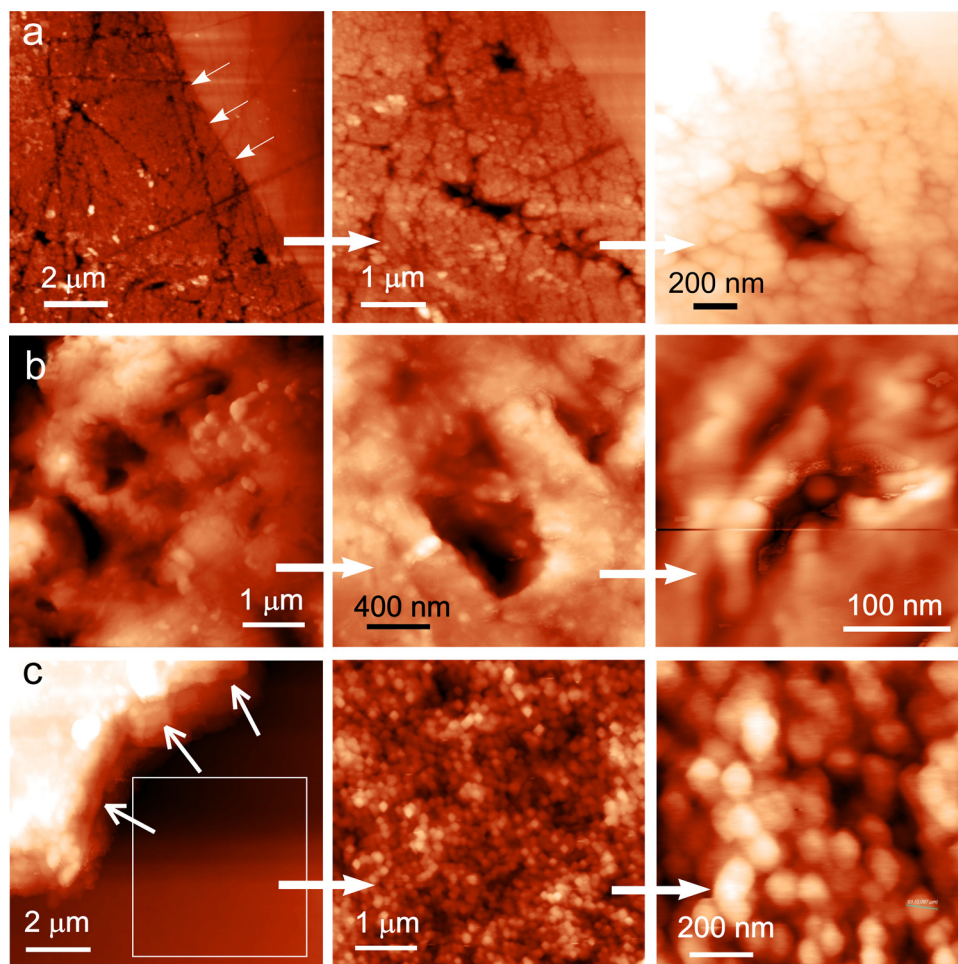


Рис. 8. АСМ-изображения внутренних стенок трёх разных включений в аквамарине. Стрелками обозначены границы между внутренней стенкой включения и полированной поверхностью (а) или поверхностью разлома (с). На изображении b такая граница находится за областью сканирования

Fig. 8. AFM-images of the inner walls of three different inclusions in aquamarine. Arrows indicate the boundary between the inner wall of the inclusion and the polished surface (a) or the fault surface (c). The same boundary on the image b is beyond the scan area

3. Котельникова З. А., Котельников А. Р. NaF-содержащие флюидные включения в кварце, синтезированные при 450–500 °С и $P = 200–2000$ бар // Геохимия. 2004. № 8. С. 908–912.

4. Кузнецов С. К., Лютое В. П., Котова Е. Н., Шанина С. Н. Приполярноуральская кварцевожильно-хрустальная провинция и перспективы поисков месторождений особо чистого кварца // Разведка и охрана недр. 2007. № 10. С. 36–43.

5. Лотов В. А., Кутугин В. А., Ревенко В. В. Управление процессами поризации термопеносиликатных изделий на основе жидкого стекла // Стекло и керамика. 2009. № 11. С. 19–22. https://portal.tpu.ru/SHARED/k/KUTUGIN/Trydi/Tab1/GC_2009.pdf.

6. Перетяжко И. С., Смирнов С. З., Котельников А. Р., Котельникова З. А. Экспериментальное изучение системы $H_3BO_3-NaF-SiO_2-H_2O$ при 350–800 °С и 1–2 кбар методом синтетических флюидных включений // Геология и геофизика. 2011. № 51 (4). С. 450–472.

7. Пискунова Н. Н., Радаев В. А., Крючкова Л. С., Сокирина Н. В. Атомно-силовая микроскопия в решении задач реконструкции природных кристаллогенетических процессов // Труды Ферсмановской научной сессии ГИ КНЦ РАН. 2020. № 17. С. 442–447. DOI: 10.31241/FNS.2020.17.085.

8. Попов М. П., Николаев А. Г. Особенности фенакитовой минерализации с Уральских изумрудных копей // Вестник Уральского отделения РМО. Екатеринбург, 2016. № 13. С. 105–112.

9. Портнов В. Н., Чупрунов Е. В. Кинетика и морфология дислокационного роста граней кристаллов из раствора: Учебное пособие. Нижний Новгород: Изд-во Нижегородского государственного университета, 2010. 131 с.

10. Прокофьев В. Ю., Мельников Ф. П., Селектор С. Л., Трубкин Н. В., Андрусенко Н. И. Флюидные включения с коллоидными растворами в халцедоне // Материалы XIII Всероссийской конференции по термобарогеохимии совместно с IV симпозиумом APFIS. Москва, 2008. С. 225–228. <http://www.minsoc.ru/FilesBase/2008-1-115-0.pdf>.

11. Смирнов С. З., Томас В. Г., Каменецкий В. С., Козьменко О. А. Водно-силикатные жидкости в системе «редкометалльный гранит — $Na_2O-SiO_2-H_2O$ » как концентраторы рудных компонентов при высоких давлениях и температуре // Петрология. 2017. Т. 25. № 6. С. 646–658. DOI: 10.7868/S086959031706005X.

12. Чернов А. А. Элементарные процессы роста кристаллов из растворов // УФН, 1987. Т. 153. С. 678–681.

13. Чукин Г. Д. Химия поверхности и строение дисперсного кремнезёма. М.: Паладин; Принта, 2008. С. 11–22.



<http://www.chem.msu.su/rus/books/chukin-2008/chukin-2008.pdf>.

14. Юргенсон Г. А. Ювелирные и поделочные камни Забайкалья. Новосибирск: Наука, 2001. 390 с. ISBN 5-02-031581-8.

15. Юргенсон Г. А., Прокофьев В. Ю., Кононов О. В. Физико-химические условия формирования камнесамоцветной и редкометалльной минерализации месторождения Шерловая гора (Юго-Восточное Забайкалье) // XVIII Всероссийская конф. по термобарогеохимии. М.: Изд-во Первого МГМУ им. Сеченова. 2018. С. 156–158.

16. Balitsky V. S., Kurashige M., Balitskaya L. V., Iwasaki W. Study of quartz solubility and «heavy» phase formation under industrial synthetic quartz growth conditions. Joint ISHR&ICSTR. Kochi, Japan. Kochi: Kochi University, 2000, pp. 318–321.

17. Kotelnikova Z. A. and Kotelnikov A. R. NaF-Bearing Fluid Inclusions in Quartz Synthesized at 450–500 °C and P = 500–2000 bar. *Geochem. Int.*, 2004, V. 42, No. 8, pp. 794. <https://www.sibran.ru/upload/iblock/224/22431b5493a5d71fc525247de5dc8d0e.pdf>.

18. Kotelnikova Z. A., Kotelnikov A. R. Synthetic NaF-Bearing Fluid Inclusions. *Geochem. Int.*, 2002, V. 40, No. 6, p. 594.

19. Łodziński M., Sitarz M., Stec K., Kozanecki M., Fojud Z. Jurga S. Raman single-crystal spectra. «ICP, IR, Raman, NMR investigations of beryls from pegmatites...». *J. Mol. Struct.*, 2005, 744–747, pp. 1005–1015. DOI: 10.1016/j.molstruc.2004.12.042.

20. Melcher, J., Carrasco, C., Xu, X., Carrascosa, J. L., Gomez-Herrero, J., Jose de Pablo, P., & Raman, A. Origins of phase contrast in the atomic force microscope in liquids. *Proceedings of the National Academy of Sciences*, 2009, V. 106, No. 33, pp. 13655–13660. DOI:10.1073/pnas.0902240106.

21. Naffouti M., Backofen R., Salvalaglio M., Bottein T., Lodari M., Voigt A., David T., Benkouider A., Fraj I., Favre L., Ronda A., Berbezies I., Grosso D., Abbarchi M., Bollani M. Complex dewetting scenarios of ultrathin silicon films for large-scale nanoarchitectures. *Sci. Adv.*, 2017, V. 3, pp. 1472–1482. DOI: 10.1126/sciadv.aao1472.

22. Piskunova, N. N. Sokerina N. V. and Kruchkova L. Y. Combining In Situ and Ex Situ Atomic-Force Microscopy Studies to Reconstruct Natural Crystallogenic Processes. *Atomic Force Microscopy Principles, Developments and Applications* (Eds.: Moss B., Stone C.). New York: Nova Science Publishers, 2018, pp. 47–66. ISBN: 978-1-53613-496-4. https://www.researchgate.net/publication/324647622_The_Role_of_Defects_in_Crystal_Dissolution_Processes_AFM_Data

23. Prokofiev V., Banks D., Lobanov K., Selektor S., Milichko V., Borovikov A., Akinfiev N., Lüders V., Chicherov, M. Exceptional Concentrations of Gold Nanoparticles in 1,7 Ga Fluid Inclusions From the Kola Superdeep Borehole, Northwest Russia. *Scientific Reports*, 2020, V. 10, p. 1108. DOI: 10.1038/s41598-020-58020-8.

24. Prokofiev V. Yu., Kamenetsky V. S., Selektor S. L., Rodemann T., Kovalenker V. A., and Vatsadze S. Z. First direct evidence for natural occurrence of colloidal silica in chalcedony-hosted vacuoles and implications for ore-forming processes. *Geology*, 2017, V. 45, No. 1, pp. 71–74. DOI: 10.1130/G38517.1.

25. Smirnov, S. Z., Thomas, V. G., Kamenetsky, V. S., Kozmenko, O. A. Hydrosilicate liquids in the system «rare-metal granite – Na₂O–SiO₂–H₂O» as accumulators of ore components at high pressure and temperature. *Petrol.*, 2017, V. 25, No. 6, pp. 625–635. DOI: 10.1134/s0869591117060054.

26. Visovsky N. J., Ukrainczyk L., Dawes S. B. Fabrication of micrometer and nanometer scale structures in silica

sol-gel films using electron beam writing methods. *J. Vac. Sci. & Tech. B.*, 2002, V. 20, pp. 932–935. DOI: 10.1116/1.1476095.

27. Yurgenson G., Prokofiev V., Afanasieva A., Kononov O. Fluid inclusion in beryl of Sherlovaya Gora deposit (Eastern Transbaykalia, Russian Federation). *Acta Mineralog.-Petrograph*, 2019, V. 10, pp. 126. http://www.ssc.smr.ru/media/journals/izvestia/2011/2011_4_879_883.pdf.

References

1. Bukanoa V. V. *Ontoheniya ametista b osobennosti ego henezisa na primere mestorozhdeniya Hasavarka (Pripilyarnui Ural)* (Ontogeny of amethyst and features of its genesis on the example of the Khasavarka deposit (Subpolar Urals)). In: *Geolohiya, metody poiskov, razvedki I otcenki mestorozhdeni yuvelirnykh, podelochnykh I dekorativno-oblitcovochnykh kamnei* (Geology, methods of prospecting, exploration and evaluation of deposits of jewelry, ornamental and decorative-facing stones). Moscow, 1975, pp. 50–52.

2. Kotelnikova Z. A., Kotelnikov A. R. *Sinteticheskie NaF-soderzhashie fluidnye vklucheniya* (Synthetic NaF-containing fluid inclusions). *Geochemistry*, 2002, No. 6, pp. 657–663.

3. Kotelnikova Z. A., Kotelnikov A. R. *NaF-soderzhashie fluidnye vklucheniya v kvartze, sintezirovannye pri 450–500 °C i P = 200–2000 bar* (NaF-containing fluid inclusions in quartz synthesized at 450–500 °C and P = 200–2000 bar). *Geochemistry*, 2004, No. 8, pp. 908–912.

4. Kuznetsov S. K., Lutoev V. P., Kotova E. N., Shanina S. N. *Pripolyarno-uralyskaya kvartsevozhilno – khrustalennaya provintsiya I perspektivy poiskov mestorozhdeniy osobo chistogo kvarts* (Subpolar-Ural quartz-vein-crystal-bearing province and prospects of prospecting for high-purity quartz deposits). *Razvedka I okhrana nedr*, 2007, No. 10, pp. 36–43.

5. Lotov V. A., Kutugin V. A., Revenko V. V. *Upravlenie protsessami porizatsii termopenosilikatnykh izdeliy na osnove zhidkogo stekla* (Management of processes of porization of thermo-foam-silicate articles based on liquid glass). *Glass and Ceramics*, 2009, No. 11, pp. 19–22. https://portal.tpu.ru/SHARED/k/KUTUGIN/Trydi/Tab1/GC_2009.pdf

6. Piskunova N. N., Radaev V. A., Kryuchkova L. S., Sokerina N. V. *Atomno-silovaya mikroskopiya v reshenii zadach rekonstruktsii prirodnnykh kristallogeneticheskikh protsessov* (Atomic force microscopy in solving problems of reconstruction of natural crystallogenic processes). *Proceedings of Fersman scientific session of GI KSC RAS*, 2020, No. 17, pp. 442–447. DOI: 10.31241/FNS.2020.17.085.

7. Peretyazhko I. S., Smirnov S. Z., Kotelnikov A. R., Kotelnikova Z. A. *Eksperimentalnoe izuchenie sistemy H₃BO₃–NaF–SiO₂–H₂O pri 350–800 °C i 1–2 kbar metodom sinteticheskikh fluidnykh vklucheniy* (Experimental study of H₃BO₃–NaF–SiO₂–H₂O system at 350–800 °C and 1–2 kbar by synthetic fluid inclusions). *Geology and Geophysics*, 2011, V. 51, No. 4, pp. 450–472.

8. Popov M. P., Nikolaev A. H. *Osobennosti phenakitovoi mineralizatsii s Uralyskikh izumrudnykh kopey* (Features of phenakite mineralization from the Ural emerald mines). *Vestnik of Ural Branch RMS*. Yekaterinburg, 2016, No. 13, pp. 105–112.

9. Portnov V. N., Chuprunov E. B. *Kinetika I morfologiya dislokatsionnogo rosta hraney kristallov iz rastvora* (Kinetics and morphology of dislocation growth of crystal faces from solution: a textbook). *Uchebnoe posobie*. Nizhnyi Novhorod. University Press, 2010, 131 p.



10. Prokofev V. Yu., Melnikov F. P., Selektor S. L., Trubkin N. V., Andrusenko N. I. *Fluidnyye vkhlyucheniya v haltsedone* (Fluid inclusions with colloidal solutions in chalcedony). Proceedings of XIII All-Russia Conference on Thermobarogeochemistry together with IV Symposium APIFIS, 2008, Moscow, pp. 225–228. <http://www.minsoc.ru/FilesBase/2008-1-115-0.pdf>.
11. Smirnov C. Z., Thomas V. G., Kamenetsky V. S., Kozmenko O. A. *Vodno-silikatnyye zhidkosti v sisteme «redkometallnyy granit — Na₂O–SiO₂–H₂O» kak kontsentratory rudnykh komponentov pri vysokikh davlenii i temperature* (Water-silicate fluids in the system «Rare-metal granite — Na₂O–SiO₂–H₂O» as concentrators of ore components at high pressure and temperature). *Petrology*, 2017, V. 25, No. 6, pp. 646–658. DOI: 10.7868/S086959031706005X.
12. Chernov A. A. *Elementarnyye protsessy rosta kristallov iz rastvorov* (Elementary processes of crystal growth from solutions). *UFN*, 1987, V. 153, pp. 678–681.
13. Chukin G. D. *Khimiya poverkhnosti i stroyeniye dispersnogo kremnezyoma* (Surface chemistry and structure of dispersed silica). Moscow: Paladin, Printe Ltd, 2008, pp. 11–22. <http://www.chem.msu.su/rus/books/chukin-2008/chukin-2008.pdf>.
14. Yurgenson G. A. *Yuvelirnyye i podelochnyye kamni Zabaikeya* (Jewellery and ornamental stones of Transbaikalia). Novosibirsk: Nauka, 2001, 390 pp. ISBN 5-02-031581-8.
15. Yurgenson G. A., Prokofev V. Yu., Kononov O. V. *Fiziko-khimicheskiye usloviya formirovaniya kamnesamotsvetnoy i redkometallnoy mineralizatsii mestorozhdeniya Sherlovaya Gora (Yugo-Vostochnoye Zabaikalye)* (Physical and chemical conditions of formation of gemstone and rare-metal mineralization of Sherlovaya Gora deposit (South-Eastern Transbaikalia)). 18th All-Russian Conference on thermobarogeochemistry, Moscow: Publishing house of the First Sechenov Moscow State Medical University, 2018, pp. 156–158.
16. Balitsky V. S., Kurashige M., Balitskaya L. V., Iwasaki W. Study of quartz solubility and «heavy» phase formation under industrial synthetic quartz growth conditions. Joint ISHR&ICSTR. Kochi, Japan. Kochi: Kochi University, 2000, pp. 318–321.
17. Kotelnikova Z. A. and Kotelnikov A. R. NaF-Bearing Fluid Inclusions in Quartz Synthesized at 450–500 °C and P = 500–2000 bar. *Geochem. Int.*, 2004, V. 42, No. 8, pp. 794. <https://www.sibran.ru/upload/iblock/224/22431b5493a5d71fc525247de5dc8d0e.pdf>.
18. Kotelnikova Z. A., Kotelnikov A. R. Synthetic NaF-Bearing Fluid Inclusions. *Geochem. Int.*, 2002, V. 40, No. 6, p. 594.
19. Łodziński M., Sitarz M., Stec K., Kozanecki M., Fojud Z., Jurga S. Raman single-crystal spectra. «ICP, IR, Raman, NMR investigations of beryls from pegmatites...». *J. Molecul. Struct.*, 2005, 744–747, pp. 1005–1015. DOI: 10.1016/j.mol-struc.2004.12.042.
20. Melcher, J., Carrasco, C., Xu, X., Carrascosa, J. L., Gomez-Herrero, J., Jose de Pablo, P., & Raman, A. Origins of phase contrast in the atomic force microscope in liquids. *Proceedings of the National Academy of Sciences*, 2009, V. 106, No. 33, pp. 13655–13660. DOI:10.1073/pnas.0902240106.
21. Naffouti M., Backofen R., Salvalaglio M., Bottein T., Lodari M., Voigt A., David T., Benkouider A., Fraj I., Favre L., Ronda A., Berbezier I., Grosso D., Abbarchi M., Bollani M. Complex dewetting scenarios of ultrathin silicon films for large-scale nanoarchitectures. *Sci. Adv.*, 2017, V. 3, pp. 1472–1482. DOI: 10.1126/sciadv.aao1472.
22. Piskunova, N. N. Sokerina N. V. and Kruchkova L. Y. Combining In Situ and Ex Situ Atomic-Force Microscopy Studies to Reconstruct Natural Crystallogenic Processes. *Atomic Force Microscopy Principles, Developments and Applications* (Eds.: Moss B., Stone C.). New York: Nova Science Publishers, 2018, pp. 47–66. ISBN: 978-1-53613-496-4. https://www.researchgate.net/publication/324647622_The_Role_of_Defects_in_Crystal_Dissolution_Processes_AFM_Data
23. Prokofiev V., Banks D., Lobanov K., Selektor S., Milichko V., Borovikov A., Akinfiev N., Lüders V., Chicherov, M. Exceptional Concentrations of Gold Nanoparticles in 1,7 Ga Fluid Inclusions From the Kola Superdeep Borehole, Northwest Russia. *Scientific Reports*, 2020, V. 10, p. 1108. DOI: 10.1038/s41598-020-58020-8.
24. Prokofiev V. Yu., Kamenetsky V. S., Selektor S. L., Rodemann T., Kovalenker V. A., and Vatsadze S. Z. First direct evidence for natural occurrence of colloidal silica in chalcedony-hosted vacuoles and implications for ore-forming processes. *Geology*, 2017, V. 45, No. 1, pp. 71–74. DOI: 10.1130/G38517.1.
25. Smirnov, S. Z., Thomas, V. G., Kamenetsky, V. S., Kozmenko, O. A. Hydrosilicate liquids in the system «rare-metal granite — Na₂O–SiO₂–H₂O» as accumulators of ore components at high pressure and temperature. *Petrol.*, 2017, V. 25, No. 6, pp. 625–635. DOI: 10.1134/s0869591117060054.
26. Visovsky N. J., Ukrainczyk L., Dawes S. B. Fabrication of micrometer and nanometer scale structures in silica sol-gel films using electron beam writing methods. *J. Vac. Sci. & Tech. B.*, 2002, V. 20, pp. 932–935. DOI: 10.1116/1.1476095.
27. Yurgenson G., Prokofiev V., Afanasieva A., Kononov O. Fluid inclusion in beryl of Sherlovaya Gora deposit (Eastern Transbaykalia, Russian Federation). *Acta Mineralog.-Petrograph*, 2019, V. 10, pp. 126. http://www.ssc.smr.ru/media/journals/izvestia/2011/2011_4_879_883.pdf.

Received / Поступила в редакцию 27.07.2021



Арктический вектор геологических исследований Arctic vector of geological research

УДК 553.7 + 553.04 (470.1)

DOI: 10.19110/geov.2021.8.3

Промышленные воды Хорейверской впадины Печорской плиты

Т. П. Митюшева, О. Е. Амосова

Институт геологии ФИЦ Коми НЦ УрО РАН, Сыктывкар
mityusheva@geo.komisc.ru, kramosova@geo.komisc.ru

Исследовано распространение по площади Хорейверской впадины и в гидрогеологическом разрезе йодобромных и йодоборных вод, обогащенных металлами: стронцием и литием. Показаны возможности территории для практического использования промышленных хлоридных натриевых и кальциево-натриевых подземных рассолов: построены карты распространения брома, йода, бора и промышленных стронциево-литиевых йодобромных и йодоборных рассолов в пределах трех карбонатных водоносных комплексов палеозоя (O_2-S-D_1 ; D_3-C_1 ; $C-P_1$); обозначены отдельные площади поликомпонентных кондиционных рассолов.

Ключевые слова: промышленные рассолы, бром, йод, бор, литий, стронций, водоносный комплекс, Хорейверская впадина.

Industrial brines of the Khoreyver depression of the Pechora plate

T. P. Mityusheva, O. Ye. Amosova

Institute of Geology FRC Komi SC UB RAS, Syktyvkar

We studied areal distribution of the Khoreyver depression and strontium and lithium-rich iodine-bromine and iodine-boron industrial brines in the hydrogeological section. We presented the potential of the territory for practical use of industrial sodium chloride and calcium-sodium underground brines in the maps of distribution of bromine, iodine, boron and strontium-lithium iodine-bromine and iodine-boric industrial brines within three Paleozoic calcareous aquifers (O_2-S-D_1 ; D_3-C_1 ; $C-P_1$). Separate areas with lithium-strontium iodine - bromine and iodine-boric standard quality brines are designated.

Keywords: industrial brines, bromine, iodine, boron, lithium, strontium, aquifers, Khoreyver depression.

Введение

Подземные воды глубоких горизонтов артезианских бассейнов платформ могут служить одним из источников получения ценных компонентов: бора, брома, йода, лития, стронция и других, которые как в чистом виде, так и в виде соединений с другими элементами широко используются в различных отраслях промышленности. Природные рассолы относятся к промышленным [2] при содержании полезных компонентов в количествах, превышающих условные предельные значения концентраций (мг/л): $Br \geq 250$, $I \geq 18$, $B \geq 250$, при одновременном извлечении: $Br \geq 200$, $I \geq 10$ и $B \geq 75$, а также $Li \geq 10$, $Sr \geq 300$, $Rb \geq 3$, $Cs \geq 0.5$.

Целенаправленные исследования распространения ценных компонентов в подземных водах Тимано-Печорского седиментационного бассейна начиная с 60-х годов XX в. А. Ф. Горбачева, Ю. И. Зытнера, Р. И. Иовчева, О. И. Леухиной, Н. Г. Линок, Г. П. Лысенина, Л. В. Мигунова, В. М. Милькова, Ю. Ф. Мячина, В. М. Попова, С. Б. Руфова, Н. В. Смирнова и др. показали, что пластовые воды зон затрудненного и весьма за-

трудненного водообмена могут служить кондиционным минеральным сырьем для добычи полезных компонентов: Br, I, B, Sr, Li, Rb, солей Ca, Na, K, Mg. Изучение макро- и микрокомпонентного состава подземных вод нефтяных и газовых месторождений севера европейской части России [13, 14, 17] позволило выделить рассолы нижнего палеозоя Хорейверской впадины — составной части провинции подземных промышленных вод Русской платформы — как один из наиболее перспективных комплексных источников гидроминерального сырья в регионе.

Месторождения промышленных вод в Тимано-Печорском бассейне не были разведаны, несмотря на то, что для отдельных площадей Печоро-Колвинского авлакогена (Мишвань-Командиршорская) и Хорейверской впадины (Баганская, Сандивейская и Мусюшорская) [14, 17], а также для южного купола Вуктыльского нефтегазоконденсатного месторождения [3] была выполнена прогнозная оценка эксплуатационных запасов промышленных йодобромных вод. Совместными работами института «ПечорНИПИнефть», МГАТХТ

Для цитирования: Митюшева Т. П., Амосова О. Е. Промышленные воды Хорейверской впадины Печорской плиты // Вестник геонаук. 2021. 8(320). С. 27–45. DOI: 10.19110/geov.2021.8.3.

For citation: Mityusheva T. P., Amosova O. Ye. Industrial brines of the Khoreyver depression of the Pechora plate. Vestnik of Geosciences, 2021, 8(320). С. 27–45. DOI: 10.19110/geov.2021.8.3.



им. М. В. Ломоносова, КНПО «Йодобром» и ВСЕГИНГЕО была разработана комплексная технология извлечения йода, брома, окиси магния, карбонатов лития и стронция из попутных вод нефтяных месторождений Ижма-Печорской синеклизы (Западно-Тэбукское, Пашнинское, Джьерское, Мичаюское, Северо-Савиноборское, Нижнеомринское) и Печоро-Колвинского авлакогена (Усинское, Баганское и Возейское) [12].

Следует отметить, что пластовые воды Тимано-Печорского бассейна промышленных вод в целом сопоставимы по концентрациям ценных элементов в пределах провинции подземных промышленных вод Русской платформы. Для сравнения, в рассолах Краснокамского месторождения йодобромных вод при минерализации 252–265 г/л концентрации йода изменяются в пределах 9–15 мг/л, брома — 577–880 мг/л, бора — 47–78 мг/л [22]. В промышленных водах Астраханского и Леонидовского участка месторождений йодных вод в Прикаспийской впадине содержание йода варьирует в пределах 9–35 мг/л при минерализации воды 29–32 г/л [18]. Значительно меньшие концентрации — в водах нашего региона в сравнении с рассолами солеродных бассейнов Сибирской платформы: бром до 13.6 г/л, стронций — до 8 г/л, литий — до 900 мг/л при минерализации концентрированных рассолов до 600–700 г/л [1, 5, 7, 16].

Целью проведенных исследований было выявление закономерностей распространения промышленных рассолов, оценка перспектив отдельных водоносных комплексов палеозоя Хорейверской впадины на поликомпонентные литие- и стронциеносные йодобромные и йодобромные промышленные воды с помощью статистического анализа гидрохимических параметров.

Характеристика района исследований

Хорейверская впадина размерами 280 × 120 км является структурой первого порядка Хорейверско-Печороморской синеклизы (ранее, по [20] — Печорской синеклизы) Печорской плиты (рис. 1) в соответствии со схемой тектонического районирования, выполненной по кровле карбонатов карбона — нижней перми [15]. С запада Хорейверская впадина ограничена Колвинским мегавалом Печоро-Колвинского авлакогена, с востока — валом Сорокина Варандей-Адзвинской структурно-тектонической зоны и поднятием Чернышёва Предуральского краевого прогиба. На юге Хорейверская впадина сужается и сочленяется с Большесынинской впадиной Предуральского прогиба.

Наличие погребенного Большеземельского палеосвода фундамента в значительной степени предопределило особенности строения и мощности (4–7 км) осадочного выполнения Хорейверской впадины. В истории развития отмечены длительные перерывы в осадконакоплении, сопровождаемые глубокими размывами отложений до полного их отсутствия: на части ее территории отсутствуют нижнеордовикские, верхнесилурийские, нижнее- и верхнедевонские, нижнекаменноугольные, нижнепермские осадки, размыты терригенные среднедевонско-нижнефранские толщи [20, 21].

По мезозойскому и верхнепалеозойскому комплексам отложений впадина является отрицательной структурой, открывается в сторону акватории Печорского моря и объединяется с Русской моноклиной

в Хорейверско-Печороморскую синеклизу [15]. Это вызвано сменой в предсреднеюрскую эпоху регионального наклона слоев с восточного на северный [20, 21]. В этом же направлении изменился и наклон многих структур Хорейверской впадины. В современном структурном плане она представляет собой моноклиаль, наклоненную к северо-западу, осложненную тектоническими нарушениями субмеридионального простирания, разбивающими ее на отдельные блоки. Структуры второго порядка в пределах впадины выделены на рисунке 1.

Гидрогеологический разрез Хорейверской впадины изучен до глубины 4.9 км. При исследовании подземных вод, сопутствующих месторождениям углеводородов, в ходе структурно-поисковых и разведочных работ за период 1971–2016 гг. были опробованы воды осадочных отложений широкого стратиграфического диапазона — от ордовикских до четвертичных. Пластовые рассолы приурочены к следующим водоносным комплексам (ВК): кембрийских и нижнеордовикских отложений (Є–О₁); среднеордовикских, силурийских и нижнедевонских карбонатных отложений (О₂–S–D₁); верхнедевонско-нижнекаменноугольных (семилукско-турнейских) карбонатных отложений (D₃–C₁); каменноугольно-нижнепермских (верхневизейско-нижнепермских) карбонатных отложений (C–P₁); терригенных пермских (P_{1–2}) и триасовых (Т) отложений (рис. 2). В разрезе также выделяются тиманско-саргаевский (D₃tm–sr) региональный флюидоупор, представленный глинисто-карбонатными породами мощностью до 300 м, отделяющий карбонатные О₂–S–D₁ и D₃–C₁ ВК, и флюидоупорные терригенные толщи — нижнекаменноугольные (C₁v+C₁s) и нижнепермские (P₁ag–P₁k). На севере впадины верхняя часть триасового терригенного комплекса и вышезалегающие толщи юрского — четвертичного возраста расположены в зоне многолетнемерзлых пород.

Материалы и методы

Для характеристики промышленных поликомпонентных литие- и стронциеносных йодобромных и йодобромных вод, анализа их распространения использованы данные фондовых и опубликованных работ об исследованиях пластовых вод, выполненных различными организациями: ПГО «Ухтанефтегазгеология», ВНИИГАЗ, ТПО ВНИГРИ (ТП НИЦ), ВСЕГИНГЕО, ПечорНИПИнефть и др. Вся имеющаяся информация по параметрам подземных вод ВК была собрана в единый электронный банк гидрогеохимических данных для последующего проведения их статистической обработки, проведена тщательная разбраковка фактического аналитического материала. Всего по подземным водам Хорейверской впадины Тимано-Печорского бассейна имеются результаты химических анализов по 379 точкам опробования, охватывающим гидрогеологический разрез от ордовикского до юрского возраста. Для статистического анализа в данной работе были выбраны 357 точек наблюдения пластовых рассолов с минерализацией более 35 г/л (табл. 1), в которых определены основные анионы и катионы (Na⁺, Ca²⁺, Mg²⁺, HCO₃⁻, SO₄²⁻, Cl⁻), полезные компоненты (Br, I, B, Li, Sr) и имеется информация по глубине опробования ВК. Распределение точек опробо-

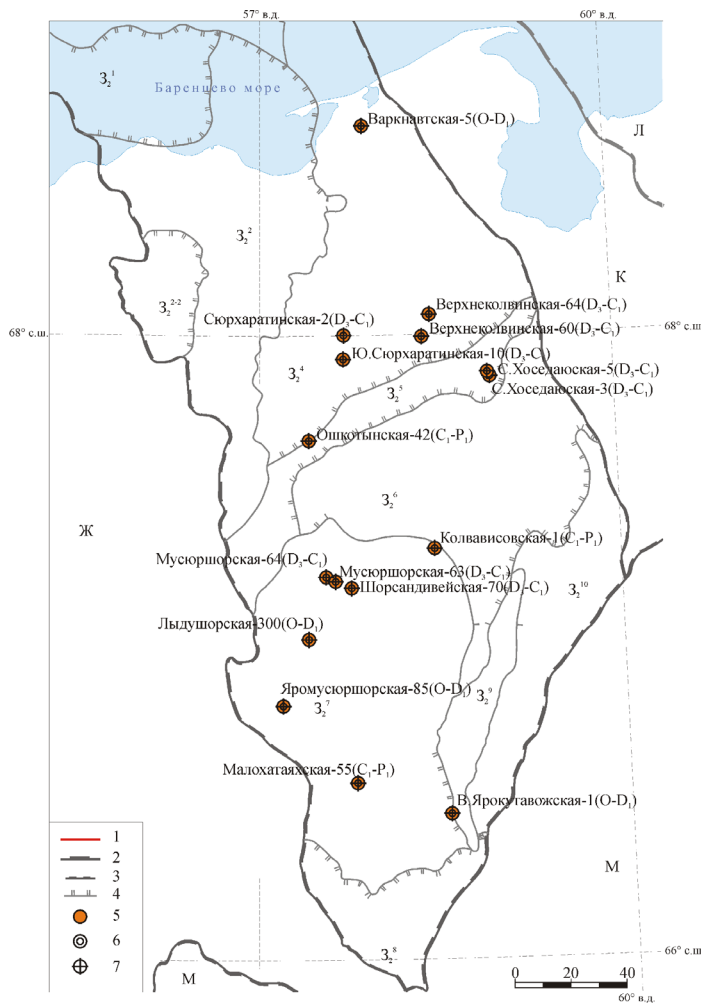


Рис. 1. Структурно-тектоническая карта Хорейверской впадины и перспективные площади для комплексного извлечения ценных компонентов из рассолов. 1–3 — границы тектонических структур: 1 — надпорядковые, 2 — первого порядка, 3 — второго порядка; 4–6 — перспективные площади (скважины) поликомпонентных промышленных вод, их наименование (индекс геологического возраста водоносного комплекса): 4 — йодобромные ($I \geq 10$ мг/л, $Br \geq 200$ мг/л) и йодоборные ($I \geq 10$ мг/л, $B \geq 75$ мг/л), 5 — стронциеносные ($Sr \geq 300$ мг/л), 6 — литиеносные ($Li \geq 10$ мг/л). Элементы тектонического районирования по [15]: Ж — Печоро-Колвинский авлакоген; 3 — Хорейверско-Печороморская синеклиза (3_2 — Хорейверская впадина; 3_2^1 — Кошкинская котловина; 3_2^2 — Чернореченская ступень; 3_2^3 — Паханчская терраса; 3_2^4 — Садаятинская ступень; 3_2^5 — Центрально-Хорейверский уступ; 3_2^6 — Коллависовская ступень; 3_2^7 — Сандивейское поднятие; 3_2^8 — Сынянырдская депрессия, 3_2^9 — Макариха-Салюкинская антиклинальная зона; 3_2^{10} — Цильегорская депрессия; К — Варандей-Адзвинская структурно-тектоническая зона; Л — Припайхойско-Приюжноновоземельский мегапрогиб; М — Предуральский краевой прогиб

Fig. 1. Structure-tectonic map of the Khoreyver depression and potential areas for complex extraction of valuable components from brines. 1–3 — boundaries of tectonic structures: 1 — supra-order, 2 — first order, 3 — second order; 4–6 — potential areas (boreholes) of multicomponent industrial brines, their name (index of the geological age aquifer): 4 — iodine-bromine ($I \geq 10$ mg/l, $Br \geq 200$ mg/l) and iodine-boron ($I \geq 10$ mg/l, $B \geq 75$ mg/l), 5 — strontium ($Sr \geq 300$ mg/l), 6 — lithium ($Li \geq 10$ mg/l). Elements of tectonic zonation according to [15]: — Pechora-Kolva aulacogen; 3 — Khoreyver-Pechoromorsk tectonic depression (3_2 — Khoreyver depression; 3_2^1 — Koshkin depression; 3_2^2 — Chernorechensk step; 3_2^3 — Pahanchesk terrace; 3_2^4 — Sadayaginsk step; 3_2^5 — Central-Khoreyver scarp; 3_2^6 — Kolvavisov step; 3_2^7 — Sandivey uplift; 3_2^8 — Synyanyrd depression, 3_2^9 — Makariha-Salukin anticlinal zone; 3_2^{10} — Tsilegorsk depression; K — Varandey-Adzva structure-tectonic zone; L — Pre-Paykhoy-Pre-Southern-Nonovozemelsk megadepression; M — Pre-Ural foredeep

вания (скважин) по водоносным комплексам (O_2-S-D_1 , D_3-C_1 , $C-P_1$) исследуемой площади приведено на рисунках 1, 3–5. Следует отметить, что определения ценных компонентов (B, I, Li, Sr, Rb) при опробовании пластовых вод были выполнены не во всех скважинах (табл. 1).

Для расчета статистических характеристик использовалась программа Statistica 6.0. Описательные статистики, приведенные в таблице 1, отражают большие вариации значений изученных параметров вод, что связано с их приуроченностью к различным по литолого-фациальным условиям водовмещающим породам (рис. 2), залегающим в широком интервале глубин 1.1–4.9 км. Не исключаются также ошибки в определении содержаний отдельных компонентов в процессе аналитических исследований. Большинство приведенных в таблице 1 параметров не подчиняются закону нормального распределения. Проверка осуществлялась статистическими критериями Колмогорова — Смирнова с поправкой Лиллиефорса, Шапиро — Уилка, оценкой величин асимметрии и эксцесса (табл. 2), а также с помощью визуальной оценки нормальных вероятностных графиков и частотных гисто-

грамм с кривыми нормального распределения. Поэтому для наиболее полного и правильного описания данных помимо средних арифметических значений и стандартных отклонений параметров в таблице 1 приведены значения медианы* и нижнего и верхнего квартилей** (25-го и 75-го процентилей). Медиана значительно меньше, чем среднее арифметическое и стандартное отклонение, подвержена влиянию крайних вариантов параметра (очень маленьких или очень больших значений). Нижний и верхний квартили, а также размах вариации используются в качестве мер рассеяния значений параметров.

* Медиана (Me) — значение, которое делит распределение пополам, т. е. слева и справа от медианного значения находится по 50 % значений.

** Нижний квартиль (Q_1) — значение, которое делит распределение в пропорции 1/4 от нижней точки к верхней, т. е. слева от Q_1 находится 25 % значений, справа от Q_1 — 75 % значений. Верхний квартиль (Q_3) — значение, которое делит распределение в пропорции 3/4 от нижней точки к верхней, т. е. слева от Q_3 находится 75 % значений, справа от Q_3 — 25 % значений. $Me = Q_2$.

Система	Отдел	Ярус	Лито- логический разрез	Гидрогео- логический этаж	Гидрогео- логический комплекс (номер)	Флюидо- упорная толща
Четвертичная	Q				Четвертичных отложений Q	
Меловая	K			Меловых отложений K (9)		
Юрская	J	Верхний - J ₃				J ₃ v-K, nk На севере бассейна
		Средний - J ₂				
		Нижний - J ₁				
Триасовая	T	Верхний - T ₃			Нижне - среднеюрских отложений J ₁ -J ₂ (8)	
		Средний - T ₂				
		Нижний - T ₁			Триасовых отложений T (7)	
Пермская	P	Верхний (Татарский) - P ₃	Татарский - P ₃ t		Нижне-верхнепермских отложений P ₃ (6)	
		Средний (Биярмийский) - P ₂	Уржумский - P ₂ ur Казанский - P ₂ kz			
		Нижний (Приуральский) - P ₁	Уфимский - P ₁ u Кунгурский - P ₁ k Артинский - P ₁ ar Сакмарский - P ₁ s Ассельский - P ₁ d			P ₁ ar ₂ - P ₁ k региональная
			Верхний - C ₃		Каменноуголь- но-нижне- пермских отложений C-P ₁ (5)	
			Средний - C ₂			
		Нижний - C ₁	Московский - C ₂ m Башкирский - C ₂ b Серпуховский - C ₂ s			C ₁ v-C ₁ s зональная
			Визейский - C ₁ v		Верхнедевонско- нижнекаменноугольных отложений D ₃ sm-C ₁ t (4)	
			Турнейский - C ₁ t			
		Верхний - D ₃	Фаменский - D ₃ fm			D ₃ tm+sr региональная
			Франский - D ₃ f			
Девонская	D	Средний - D ₂	Живетский - D ₂ zv Эйфельский - D ₂ ef		Среднедевонско- нижнефранских отложений D ₂ -D ₃ f (3)	
		Нижний - D ₁				
		Верхний - S ₂	Пржидольский - S ₂ p Лудловский - S ₂ ld		Среднеордовикских, силурийских и нижнедевонских отложений O ₂ -S-D ₁ (2)	
			Венлокский - S ₂ v			
Силурийская	S	Нижний - S ₁	Лландоверийский - S ₁ l			
Ордовикская	O	Верхний - O ₃	Ашгильский - O ₃ as Карадокский - O ₃ k			
		Средний - O ₂	Лландвирский - O ₂ ld			
		Нижний - O ₁	Аренигский - O ₁ ar Тремадокский - O ₁ t			
Кембрий-Є	Є			Є-O ₁	Кембрийских и нижнеордовикских пород Є-O ₁ (1)	
Протерозой-PR	PR			PR		

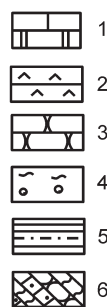


Рис. 2. Гидрогеологическая стратификация Тимано-Печорского осадочного бассейна: 1 — известняки, доломиты; 2 — ангидриты, гипсы; 3 — песчаники; 4 — суглинки, пески, галечники; 5 — глины, алевролиты, аргиллиты; 6 — метаморфические сланцы

Fig. 2. Hydrogeological stratification of the Timan-Pechora sedimentary basin: 1 — limestone, dolomite; 2 — anhydrite, gypsum; 3 — sandstone; 4 — loam, sand, pebble-bed; 5 — clay, siltstone, claystone; 6 — metamorphic schist

Для выявления силы и направления взаимосвязи между гидрохимическими характеристиками водоносных комплексов был применен корреляционный анализ с расчётом коэффициентов корреляции Спирмена (табл. 3). Выбор непараметрического коэффициента корреляции рангов Спирмена обусловлен тем, что большинство параметров имеют распределения, статистически значимо (для заданного критического уровня значимости 0.05) отличающиеся от нормального; исключения составляют параметры: давление, температура, содержание брома.

Методика построения карт. Гидрохимические карты распространения ценных компонентов промышленных вод Хорейверской впадины построены с использованием программного пакета ArcGis, геоинформационной системы Golden Software Surfer 11, Corel Draw 13. Контуры Хорейверской впадины и тектонических структур 2-го порядка приведены в соответствии с тектоническим районированием Тимано-Печорского осадочного бассейна [15]. Карты выполнены для трех водоносных комплексов: O₂-S-D₁, D₃-C₁, C-P₁. Рассолы терригенных нижнесреднеордовикских

Таблица 1. Результаты статистической обработки показателей рассолов Хорейверской впадины
Table 1. Results of statistical processing of the parameters brines the Khoreyver depression

Параметры Parameters	Описательные статистики / Descriptive statistics								
	Число наблюдений Number of observations	Среднее Average	Медиана Median	Минимум Minimum	Максимум Maximum	Нижняя квартиль Lower quartile	Верхняя квартиль Upper quartile	Стандартное отклонение Standard deviation	Коэффициент вариации, % Variation factor, %
Глубина, м / Depth, m	357	2818.2	2886.0	1147.0	4865.0	2241.0	3375.0	721.3	25.6
Минерализация, г/л Mineralization, g/l	357	136.2	141.0	36.2	211.1	107.5	175.6	44.2	32.5
Температура, °C Temperature, °C	72	63.6	66.5	32.0	99.0	53.9	76.5	16.7	26.3
pH	345	6.5	6.9	3.1	10.9	6.0	7.2	1.0	14.9
Давление, кг/см ² Pressure, kg/cm ²	35	305.3	290.0	160.0	476.0	235.0	369.0	84.0	27.5
Na, г/л	357	39.3	41.4	9.0	65.5	31.4	51.4	13.9	35.3
K, мг/л	279	1148.3	1070.0	32.0	3620.0	600.0	1674.0	736.5	64.1
Mg, мг/л	356	1816.2	1714.6	206.7	4080.0	1398.0	2189.0	681.3	37.5
Ca, г/л	357	9.4	9.5	2.7	41.3	7.1	11.7	3.3	34.7
Cl, г/л	357	83.2	85.5	22.4	129.4	65.9	107.2	26.9	32.3
SO ₄ , мг/л	357	825.7	747.0	3.5	3980.0	261.7	1155.9	678.2	82.1
HCO ₃ , мг/л	353	213.1	182.0	3.1	1024.8	103.7	268.4	157.0	73.6
Br, мг/л	357	357.9	363.4	67.0	1027.2	251.0	475.8	154.7	43.2
I, мг/л	355	15.6	15.0	0.4	52.9	9.0	20.0	8.7	56.2
B, мг/л	202	61.7	57.0	1.4	169.7	40.0	81.0	34.8	56.4
Li, мг/л	100	16.1	15.0	0.1	45.3	10.0	19.0	9.4	58.0
Sr, мг/л	100	407.4	402.0	49.0	1080.0	279.2	501.0	179.1	44.0
Rb, мг/л	19	1.0	0.9	0.1	3.0	0.2	1.5	0.9	86.1
H ₂ S, мг/л	230	6.6	0.9	0.0	154.0	0.4	2.7	19.5	294.2
rNa/rCl	357	0.7	0.7	0.3	0.8	0.7	0.8	0.1	8.0
Cl/Br	357	249.7	244.5	118.0	559.0	217.7	279.6	51.7	20.7
(rCl-rNa)/rMg	356	4.7	4.6	1.3	14.4	3.6	5.6	1.8	37.8

**Таблица 2.** Результаты проверки распределений параметров рассолов Хорейверской впадины на нормальность статистическими критериями**Table 2.** Results of checking the difference between distributions of parameters of brines of the Khoreyver depression from the normal distribution according to statistical criteria

Параметры / Parameters	Число наблюдений Number of observations	d	p	W	p	A	E
Глубина, м / Depth, m	357	0.090	< 0.01	0.980	9E-05	-0.16	-0.51
Минерализация, г/л / Mineralization, g/l	357	0.088	< 0.01	0.949	< 1E-05	-0.50	-0.70
Температура, °C / Temperature, °C	72	0.081	> 0.20	0.970	8.8E-02	-0.18	-0.56
pH	345	0.159	< 0.01	0.905	< 1E-05	-0.74	1.65
Давление, кг/см ² / Pressure, kg/cm ²	35	0.106	> 0.20	0.964	0.306	0.17	-0.81
Na, г/л	357	0.087	< 0.01	0.943	< 1E-05	-0.54	-0.69
K, мг/л	279	0.085	< 0.01	0.963	< 1E-05	0.57	-0.02
Mg, мг/л	356	0.074	< 0.01	0.983	3E-04	0.46	0.43
Ca, г/л	357	0.071	< 0.01	0.848	< 1E-05	2.45	23.80
Cl, г/л	357	0.089	< 0.01	0.951	< 1E-05	-0.48	-0.71
SO ₄ , мг/л	357	0.113	< 0.01	0.902	< 1E-05	1.33	3.04
HCO ₃ , мг/л	353	0.126	< 0.01	0.857	< 1E-05	1.83	4.88
Br, мг/л	357	0.042	< 0.15	0.979	4E-05	0.17	0.02
I, мг/л	355	0.081	< 0.01	0.922	< 1E-05	1.25	3.29
B, мг/л	202	0.088	< 0.01	0.970	2.9E-04	0.61	0.24
Li, мг/л	100	0.149	< 0.01	0.941	2.3E-04	0.9	1.00
Sr, мг/л	100	0.077	< 0.20	0.950	8.3E-04	0.86	2.36
Rb, мг/л	19	0.186	< 0.1	0.902	5.2E-02	0.91	0.15
H ₂ S, мг/л	230	0.367	< 0.01	0.349	< 1E-04	5.03	27.77
rNa/rCl	357	0.180	< 0.01	0.845	< 1E-05	-1.71	5.28
Cl/Br	357	0.055	< 0.01	0.957	< 1E-05	0.92	3.97
(rCl-rNa)/rMg	356	0.093	< 0.01	0.924	< 1E-05	1.29	3.97

Примечание: d — значение критерия Колмогорова — Смирнова (с поправкой Лиллиефорса уровня значимости), W — значение критерия Шапиро — Уилка, p — достигнутый уровень значимости, A — коэффициент асимметрии, E — коэффициент эксцесса.

Note: d — value of the Kolmogorov — Smirnov test with Lilliefors significance correction, W — value of the Shapiro — Wilk test, p — achieved level of significance, A — skewness, E — kurtosis.

толщ исследованы в одной скважине 12 на Средне-макарихинской площади. Для ВК терригенных пермских (P₁₋₂) и триасовых (T) отложений карты не приводятся в связи с малым количеством точек опробования и отсутствием промышленных концентраций ценных компонентов в рассолах. На трех гидрохимических картах в точках опробования вод (скважинах) соответствующими условными знаками показаны содержания полезных компонентов брома (рис. 3), йода (рис. 4), бора (рис. 5), а также содержания йодобромных (рис. 4) и йодоборных (рис. 5) рассолов при условии их соответствия кондиционным требованиям. Литий и стронций для этих точек наблюдений отмечены специальными знаками при концентрации выше условных предельных значений. Построение изолиний выполнено в геоинформационной системе Golden Software Surfer 11, алгоритм интерполяции — минимизация кривизны (Minimum Curvature); визуализация и последующая авторская интерпретация с учётом структурно-тектонических особенностей впадины проведены в Corel Draw 13.

Результаты и их обсуждение

Подземные пластовые рассолы Хорейверской впадины, исследованные в данной работе, залегают на глубинах до 4.9 км в зонах затрудненного и весьма затрудненного водообмена. Рассолы с максимальной ми-

нерализацией 211 г/л на этих глубинах имеют температуру 32—99 °C (геотермический градиент 1.6—3.0 °C/100м) и давление 160—476 кг/см² (коэффициент аномальности 0.99—1.16). Состав водорастворенных газов азотно-метановый, в водах отдельных площадей содержится сероводород (до 154 мг/л). Распределение минерализации по водоносным комплексам в зависимости от глубины опробования рассолов приведено на рисунке 6, отражает наличие гидрохимической инверсии в ВК O₂—S—D₁ и D₃—C₁. Химический состав пластовых рассолов — хлоридный (95—100 %-экв) натриевый или кальциево-натриевый (Na — 34—84 и Ca — 11—60 %-экв). Они принадлежат к хлоридному типу по классификации Курнакова — Валяшко (или хлоркальциевому типу по классификации Сулина) при условии (rCl-rNa)/rMg > 1 и rNa/rCl < 1 (табл. 1).

Промышленные бромные рассолы. Содержание брома в пластовых водах Хорейверской впадины изменяется в широких пределах (табл. 1, рис. 3, 7, а, б). Максимальные значения Br = 1027 мг/л зафиксированы в рассолах нижнесреднеордовикских толщ Среднемакарихинской площади. В 270 пробах воды (из 357 проанализированных) концентрации брома превышают 250 мг/л, следовательно, рассолы ВК карбонатных O₂—S—D₁-, D₃—C₁-, C—P₁-отложений практически на всей территории на глубине более 2.0—2.5 км и с минерализацией свыше 100 г/л (рис. 7, а, б) можно считать бромными промышленными. При применении в

Таблица 3. Матрица коэффициентов корреляции между параметрами подземных промышленных вод Хорейверской впадины (данные по 357 т. н.)

Table 3. The matrix of correlation coefficients between the parameters of industrial groundwater in the Khoreyver depression (data for 357 observation points)

Параметры Parameters	Коэффициенты корреляции Спирмена / Spearman correlation coefficients															
	Глубина Depth	Минерализация Mineralization	Na	K	Mg	Ca	Cl	SO ₄	HCO ₃	Br	I	B	Li	Sr	rNa/rCl	Cl/Br
Глубина / Depth	1.00															
Минерализация Mineralization	0.72	1.00														
Na	0.70	0.98	1.00													
K	0.80	0.77	0.75	1.00												
Mg	<i>-0.11</i>	<i>0.21</i>	<i>0.18</i>	0.06	1.00											
Ca	0.67	0.91	0.87	0.71	<i>0.09</i>	1.00										
Cl	0.71	1.00	0.98	0.77	<i>0.22</i>	0.90	1.00									
SO ₄	<i>0.49</i>	<i>0.34</i>	<i>0.36</i>	<i>0.27</i>	<i>-0.14</i>	<i>0.31</i>	<i>0.32</i>	1.00								
HCO ₃	<i>0.18</i>	<i>0.04</i>	<i>0.04</i>	<i>0.10</i>	<i>0.08</i>	<i>0.0</i>	<i>0.03</i>	<i>0.35</i>	1.00							
Br	0.81	0.89	0.86	0.84	<i>0.13</i>	0.86	0.88	<i>0.37</i>	<i>0.09</i>	1.00						
I	<i>0.23</i>	0.52	0.53	<i>0.34</i>	<i>0.24</i>	<i>0.33</i>	0.53	<i>-0.01</i>	<i>-0.04</i>	<i>0.36</i>	1.00					
B	0.59	0.59	0.55	0.81	<i>0.07</i>	0.63	0.58	<i>0.16</i>	<i>0.06</i>	0.75	<i>0.17</i>	1.00				
Li	0.51	0.62	0.60	0.64	<i>0.16</i>	0.60	0.62	<i>0.22</i>	<i>0.25</i>	0.62	<i>0.37</i>	0.68	1.00			
Sr	<i>0.14</i>	<i>0.35</i>	<i>0.30</i>	<i>0.19</i>	0.52	<i>0.36</i>	<i>0.38</i>	<i>-0.29</i>	<i>-0.14</i>	<i>0.35</i>	<i>0.38</i>	<i>0.25</i>	<i>0.28</i>	1.00		
rNa/rCl	0.53	0.50	0.58	<i>0.33</i>	<i>-0.12</i>	<i>0.30</i>	<i>0.48</i>	0.64	<i>0.19</i>	<i>0.43</i>	<i>0.31</i>	<i>0.07</i>	<i>0.21</i>	<i>-0.28</i>	1.00	
Cl/Br	-0.71	-0.52	<i>-0.49</i>	-0.66	<i>0.01</i>	-0.53	-0.51	<i>-0.34</i>	<i>-0.12</i>	-0.83	<i>-0.13</i>	-0.62	<i>-0.42</i>	<i>-0.21</i>	<i>-0.31</i>	1.00

Примечание: жирным шрифтом выделены коэффициенты корреляции по абсолютному значению больше 0.5, курсивом показаны статистически значимые коэффициенты корреляции ($p < 0.05$).

Note: correlation coefficients are shown in bold for an absolute value greater than 0.5, statistically significant correlation coefficients are shown in italics ($p < 0.05$).

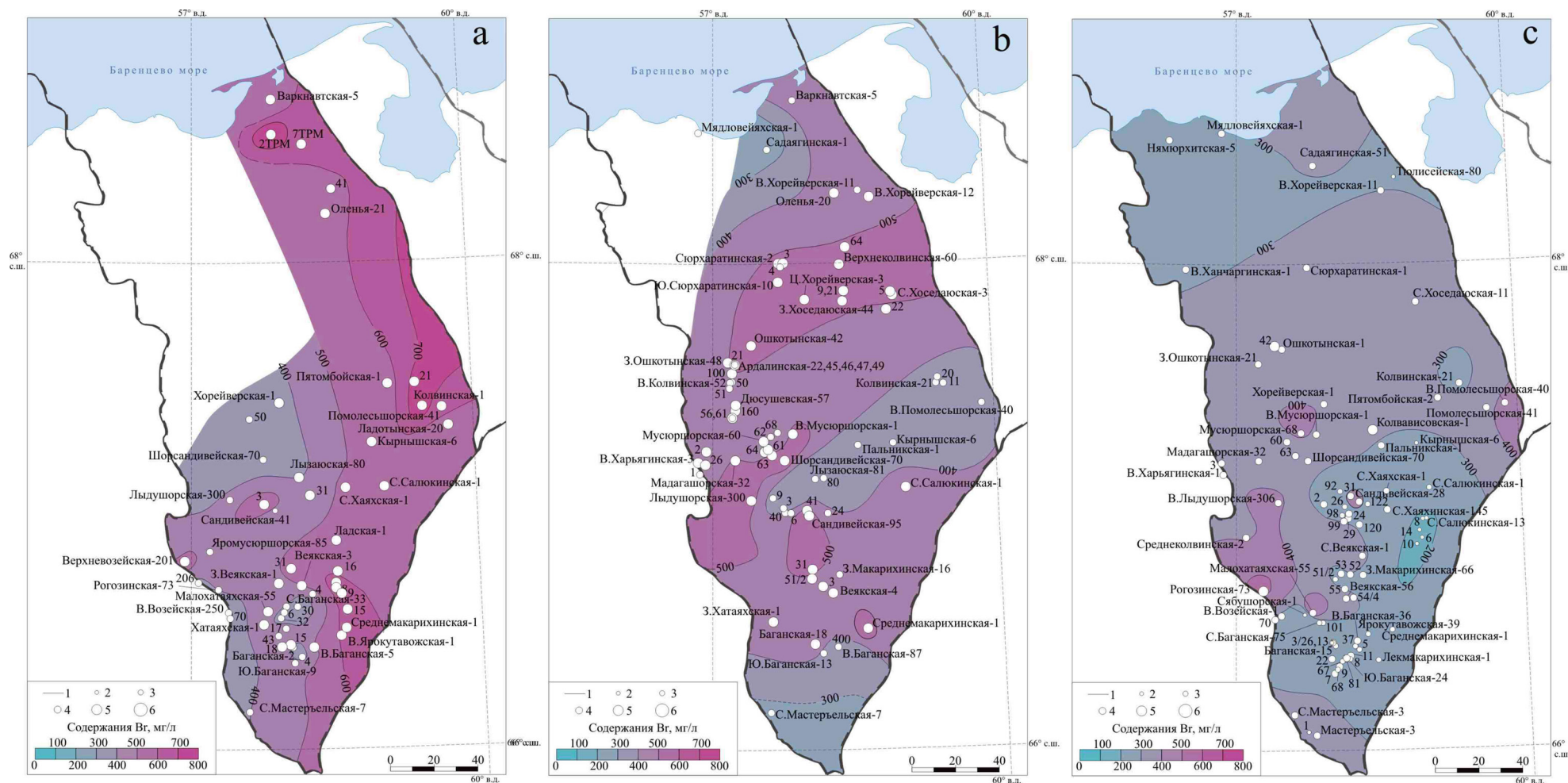


Рис. 3. Гидрохимическая карта распространения брома в промышленных водах водоносных комплексов O_2-S-D_1 (a), D_3-C_1 (b), $C-P_1$ (c) Хорейверской впадины: 1 — изолинии концентраций брома (мг/л), 2–6 — скважина, ее наименование и номер, размер знака соответствует концентрации брома в рассолах скважины: 2 — $Br \leq 200$ мг/л, 3 — $200 < Br < 250$ мг/л, 4 — $250 < Br < 460$ мг/л, 5 — $460 < Br < 760$ мг/л, 6 — $Br \geq 760$ мг/л

Fig. 3. Hydrochemical maps of distribution of bromine in industrial brines in the aquifers of the Khoreyver depression O_2-S-D_1 (a), D_3-C_1 (b), $C-P_1$ (c) 1 — isolines of bromine concentrations (mg/l), 2–6 — well, its name and number, the size of a sign corresponds to concentration of bromine in brines: 2 — $Br \leq 200$ mg/l, 3 — $200 < Br < 250$ mg/l, 4 — $250 < Br < 460$ mg/l, 5 — $460 < Br < 760$ mg/l, 6 — $Br \geq 760$ mg/l

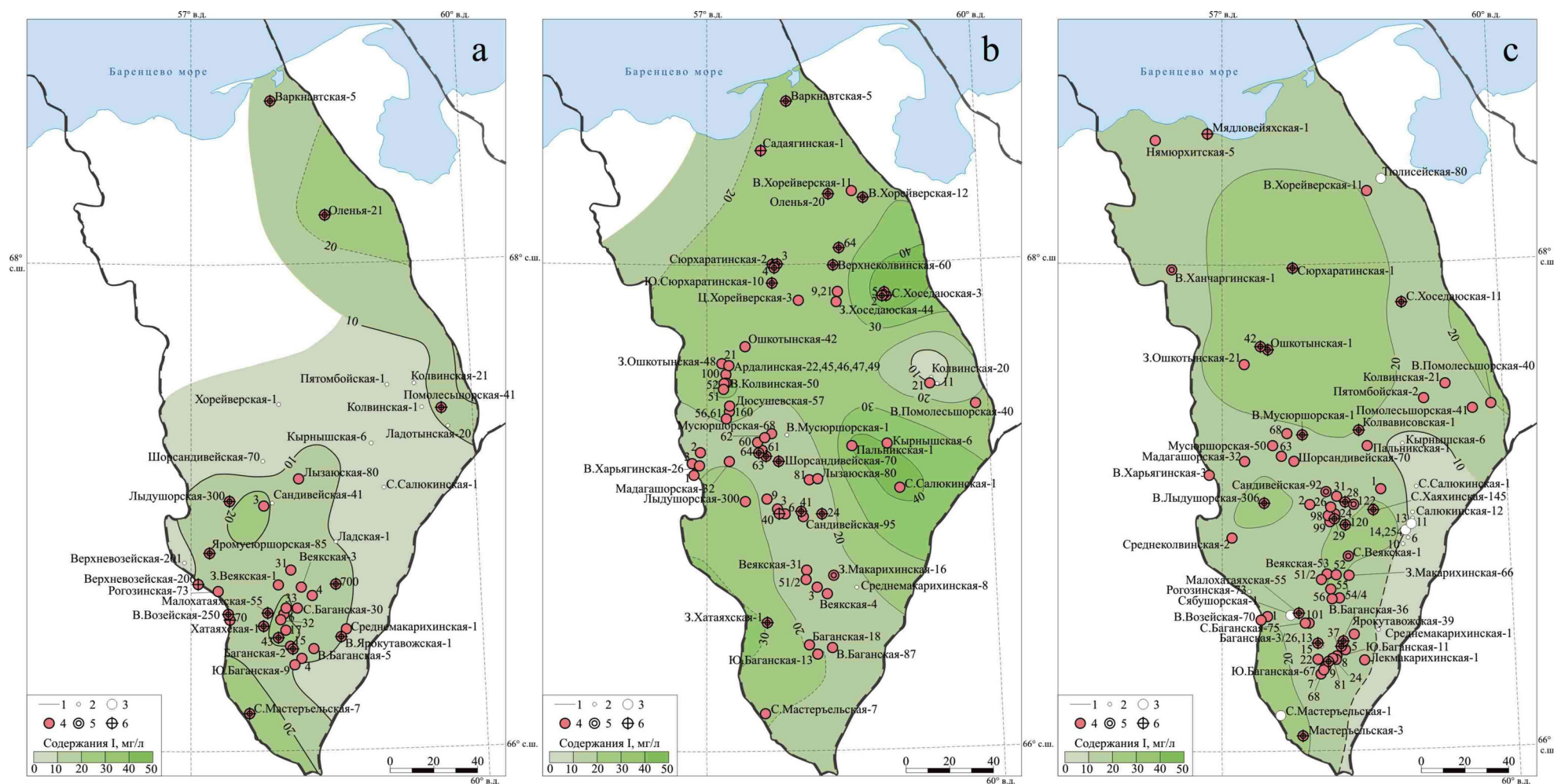


Рис. 4. Карта распространения йода и йодобромных вод, содержащих промышленные концентрации стронция и лития, в водоносных комплексах O₂-S-D₁ (а), D₃-C₁ (б), C-P₁ (в) Хорейверской впадины: 1 — изолинии концентраций йода (мг/л), 2–5 — скважина, ее наименование и номер; размер знака соответствует концентрации йода в рас-
солах: 2 — I ≤ 10 мг/л, 3 — I ≥ 10 мг/л; промышленные воды: 4 — йодобромные (при I ≥ 10 и Br ≥ 200 мг/л), 5 — стронциеносные (Sr ≥ 300 мг/л), 6 — литиеносные (Li ≥ 10 мг/л)

Fig. 4. Maps of distribution of iodine and iodine-bromine industrial waters containing industrial concentration of strontium and lithium in the aquifers of the Khoreyver depression: O₂-S-D₁ (a), D₃-C₁ (b), C-P₁ (c): 1 — isolines of concentration of iodine (mg/l), 2–5 — a well, its name and number; the size of a sign corresponds to concentration of iodine in brines: 2 — I ≤ 10 mg/l, 3 — I ≥ 10 mg/l; industrial brines: 4 — iodine-bromine (at I ≥ 10 and Br ≥ 200 mg/l), 5 — strontium (Sr ≥ 300 mg/l), 6 — lithium (Li ≥ 10 mg/l)

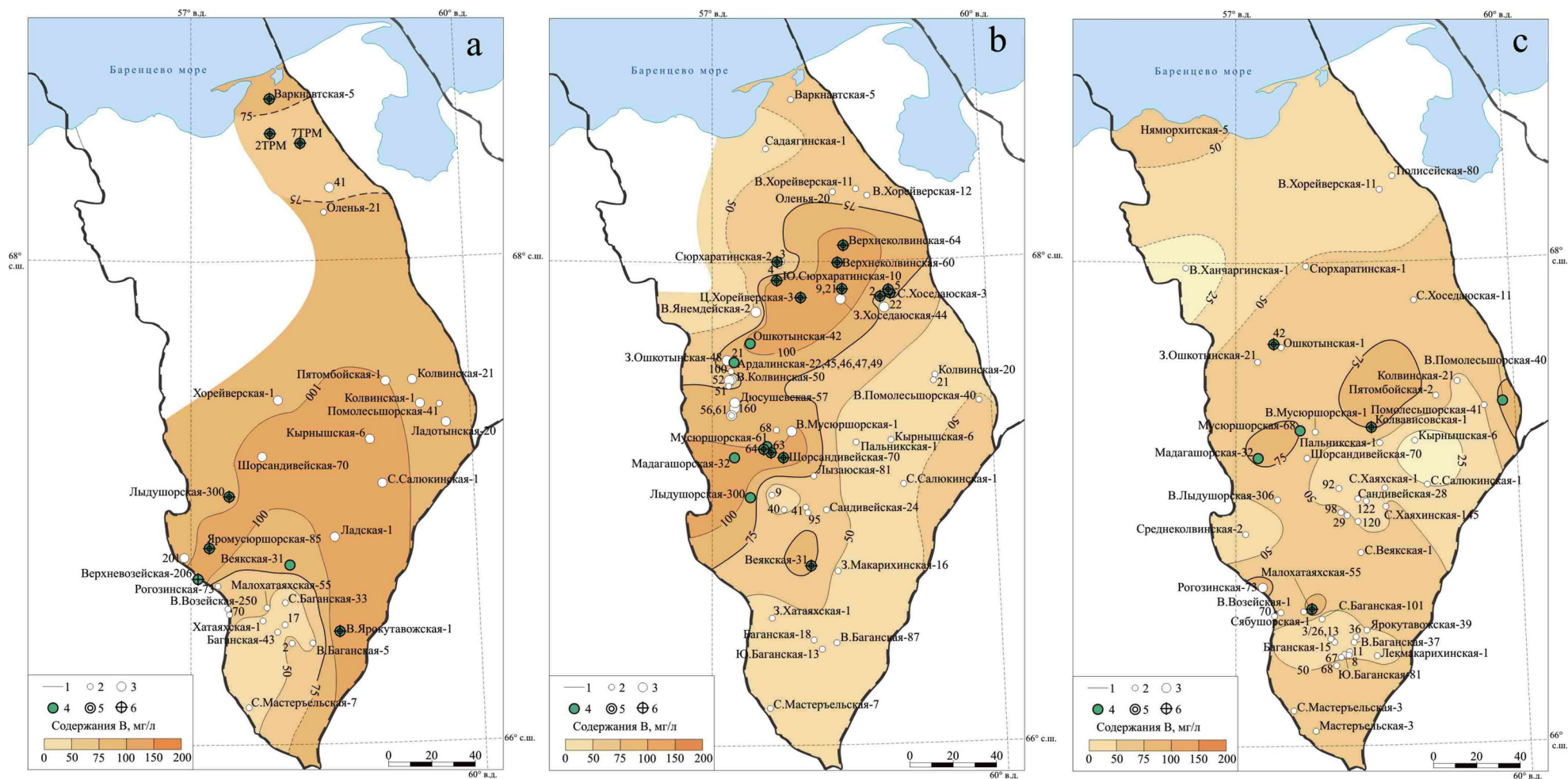


Рис. 5. Карта распространения бора и йодоборных вод, содержащих промышленные концентрации стронция и лития, в водоносных комплексах O_2-S-D_1 (a), D_3-C_1 (b), $C-P_1$ (c) Хорейверской впадины: 1 — изолинии концентрации бора (мг/л), 2, 3 — скважина, ее наименование и номер; размер знака соответствует концентрации бора в растворах (2 — $B \leq 75$ мг/л, 3 — $B \geq 75$ мг/л); промышленные воды: 4 — йодоборные ($I \geq 10$ и $B \geq 75$ мг/л), 5 — стронциеносные ($Sr \geq 300$ мг/л), 6 — литиеносные ($Li \geq 10$ мг/л)

Fig. 5. Maps of distribution of boron and iodine-boron industrial waters containing industrial concentration of strontium and lithium in the aquifers of the Khoreyver depression: O_2-S-D_1 (a), D_3-C_1 (b), $C-P_1$ (c): 1 — isolines of boron concentration (mg/l), 2, 3 — well, its name and number; the size of a sign corresponds to concentration of boron in brines: 2 — $B \leq 75$ mg/l, 3 — $B \geq 75$ mg/l; industrial brines: 4 — iodine-boron (at $I \geq 10$ and $B \geq 75$ mg/l), 5 — strontium ($Sr \geq 300$ mg/l), 6 — lithium ($Li \geq 10$ mg/l)

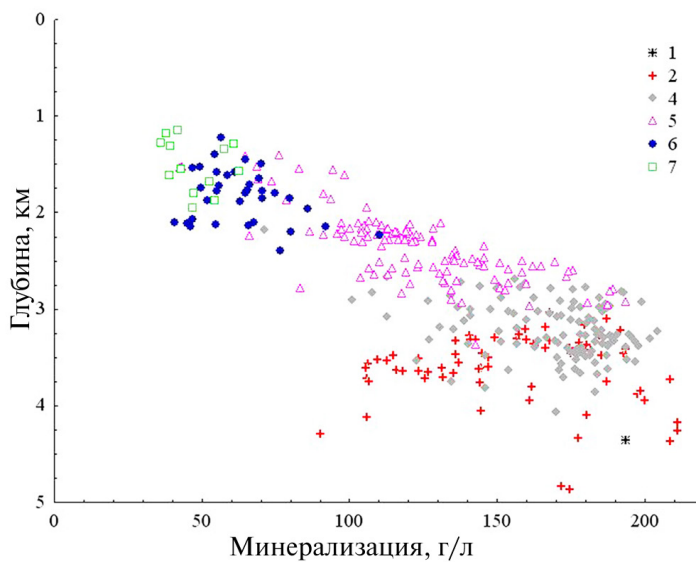


Рис. 6. Изменение величины общей минерализации в зависимости от глубины опробования подземных вод водоносных комплексов Хорейверской впадины. Номер соответствует индексу геологического возраста опробованных водоносных комплексов: 1 — кембрийских-нижнеордовикских отложений ($\epsilon-O_1$); 2 — среднеордовикских, силурийских и нижнедевонских карбонатных отложений (O_2-S-D_1); 4 — верхнедевонско-нижнекаменноугольных (семилюкско-турнейских) карбонатных отложений (D_3-C_1); 5 — каменноугольно-нижнепермских (верхневизейско-нижнепермских) карбонатных отложений ($C-P_1$); 6 — пермских терригенных отложений (P_{1-2}); 7 — триасовых терригенных отложений (Т)

Fig. 6. Changes of the mineralization depending on the depth of occurrence of the underground waters aquifers of the Khoreyver depression. Number corresponds to the index of the geological age tested aquifers complexes: 1 — Cambrian — Lower Ordovician deposits ($\epsilon-O_1$); 2 — Middle-Ordovician, Silurian and Lower Devonian carbonaceous deposits (O_2-S-D_1); 4 — Upper Devonian — Lower Carboniferous carbonaceous deposits (D_3-C_1); 5 — Carboniferous — Lower Permian carbonaceous deposits ($C-P_1$); 6 — Lower — Middle Permian terrigenous deposits (P_{1-2}); 7 — Triassic terrigenous deposits (T)

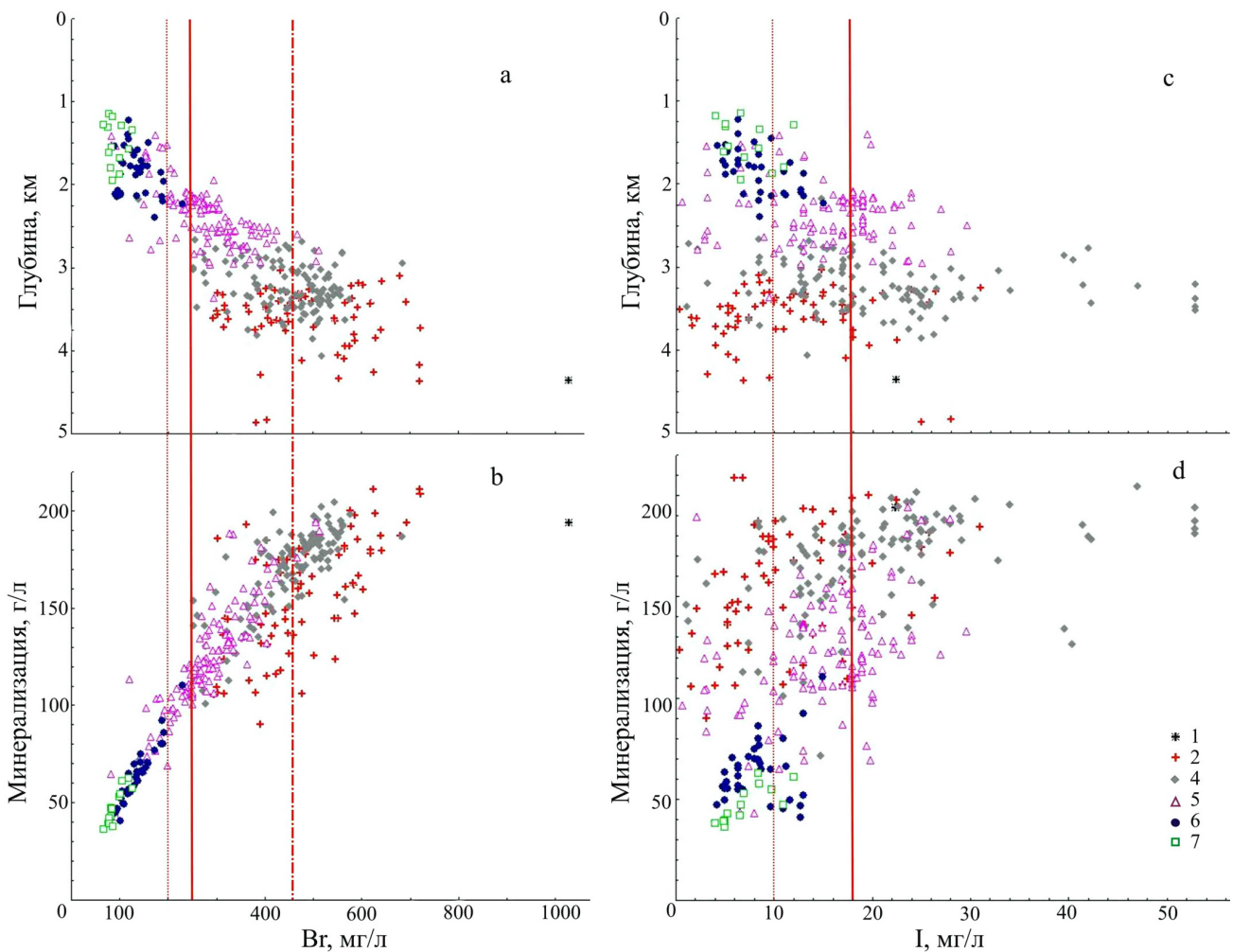


Рис. 7. Содержания брома и йода в водоносных комплексах Хорейверской впадины в зависимости от глубины опробования подземных вод (а, с) и величины минерализации вод (b, d). Линии на графиках показывают промышленные концентрации: Br = 200, 250, 460 мг/л; I = 10 и 18 мг/л. Условные обозначения — см. рис. 6

Fig. 7. Bromine and iodine concentration in the aquifers of the Khoreyver depression depending on depth of occurrence of the underground waters (a, c) and of mineralization of waters (b, d). The lines on plots show industrial concentration: Br = 200, 250, 460 mg/l; I = 10 и 18 mg/l. Symbols — see Fig. 6



качестве минимальных промышленных концентраций более жестких условий $\text{Br} > 460$ мг/л, предложенных Г. П. Лысениным*, также видно соответствие рассолов $\text{O}_2\text{-S-D}_1$ и $\text{D}_3\text{-C}_1$ ВК Хорейверской впадины типу бромных промышленных на значительной территории (рис. 3, 7, а, б). Прослеживая изменение состава Cl-Na -рассолов в стратиграфической последовательности от молодых к более древним (рис. 7), отмечаем увеличение концентраций брома с глубиной и ростом минерализации. Наличие этих зависимостей подтверждают значения коэффициентов корреляции (табл. 3). Сильная ($r_s > 0.7$) положительная связь наблюдается у брома также с натрием, калием, кальцием, хлором и бором.

Источником брома в подземных рассолах служат морские воды бассейнов седиментации и захороненные остатки организмов в осадочных породах [4, 10]. Рассчитанная величина Cl/Br -коэффициента (медиана 244.5) свидетельствует о насыщении пластовых рассолов бромом относительно нормально-морских условий ($\text{Cl/Br} = 293$). Высокие значения температуры и давления способствуют постседиментационному разложению органического вещества [4], которым обогащены породы, и концентрированию брома в пластовых водах.

Распределение брома по трем перспективным ВК Хорейверской впадины (рис. 3) свидетельствует об особенностях распределения элемента в каждом из них. В пределах $\text{O}_2\text{-S-D}_1$ ВК наибольшие концентрации наблюдаются в восточной части впадины. Однако подчеркнем, что пока данных о составе пластовых вод в северо-западной, наиболее погруженной части территории не имеется. Значения брома свыше 700 мг/л установлены в Cl-Na -, Cl-Na-Ca -водах силурийских отложений, сложенных ангидритами и доломитами, залегающими на глубинах свыше 3.7 и 4.1 км в пределах структур II порядка: Коллависовской ступени (Колвинская площадь) и севера Садаггинской ступени (скв. 2ТРМ нефтяного месторождения им. Требса). Эти наиболее глубоко залегающие площади приурочены к зонам сочленения с валом Сорокина Варандей-Адзвинской структурной зоны. Свыше 600 мг/л брома выявлено в пластовых рассолах южной части Макариха-Салюкинской антиклинальной зоны.

Водоносный комплекс $\text{D}_3\text{-C}_1$ -отложений характеризуется совершенно иным распределением брома по площади. Максимальные значения брома (684 мг/л) выявлены в скважине 1-Среднемакарихинская на глубине 2.9—3.1 км. Содержания Br свыше 500 мг/л установлены в пределах Сандивейского поднятия, южной части Садаггинской ступени и Центрально-Хорейверского выступа.

В рассолах C-P_1 ВК значения брома значительно меньше, чем в нижележащих комплексах. Содержание $\text{Br} > 500$ мг/л выявлено только в двух скважинах: 73-Рогозинская (инт. 2795—2840 м) и 42-Ошкотынская (инт. 2933—2939 м). В пределах Салюкинского вала Макариха-Салюкинской антиклинальной зоны наблю-

даются концентрации брома менее 200 мг/л, пластовые рассолы данной площади не являются кондиционными.

Промышленные йодные рассолы. Содержания йода свыше 18 мг/л выявлены в 122 точках опробования (34 % от общего числа проб), подземные воды $\text{O}_2\text{-S-D}_1$ -, $\text{D}_3\text{-C}_1$ -, C-P_1 -отложений отдельных площадей являются йодными промышленными (рис. 4, 7, с—д). Наибольшие концентрации йода приурочены к ВК карбонатных $\text{D}_3\text{-C}_1$ -отложений: содержания йода свыше 40 мг/л определены в крепких рассолах центральной части впадины на Северо-Хоседаюнской, Восточно-Колвинской, Северо-Салюкинской и Пальникской площадях. Рассолы практически всей впадины этого карбонатного комплекса, за исключением Колвинской площади и полосы, охватывающей центральную часть Большеземельского свода, являются кондиционными ($\text{I} > 18$ мг/л). ВК C-P_1 -отложений также возможно рассматривать как источник для извлечения йода, концентрации йода менее 10 мг/л наблюдаются в пределах восточной части Макариха-Салюкинской антиклинальной зоны и в зоне сочленения с грядой Чернышева. В скважине 12-Среднемакарихинская (O_{1-2}), характеризующей первый ВК, количество йода составляет 22.4 мг/л. В $\text{O}_2\text{-S-D}_1$ ВК условия для накопления и сохранения йода не столь благоприятны, только в отдельных скважинах Баганской и Оленьей площадей, 7-С. Мастерьевская, 3-Сандивейская и 1-Хатахская, отмечен йод свыше 18 мг/л, что позволяет отнести эти рассолы к йодным промышленным.

Йод не показал сильных связей ни с одним изученным параметром вод (табл. 3). Отметим заметные ($r_s = 0.52\text{—}0.53$) связи с натрием, хлором и минерализацией вод. Йод характеризуется наибольшей величиной накопления среди всех изученных компонентов: коэффициент концентрации йода в подземных рассолах Хорейверской впадины по отношению к морской воде достигает 900. Исследования гидрогеохимии йода показали, что его концентрирование происходит в водах в основном в процессе перехода элемента из морских организмов и растений, захороненных в осадочных толщах морского генезиса, в водоносный горизонт в результате взаимодействий в системе «вода — порода — газ — органическое вещество» при повышении температуры (и давления) [6, 11]. Пластовые воды Хорейверской впадины, содержащие промышленные концентрации йода, имеют температуру до 99 °С и залегают на глубинах 1.3—4.9 км, где степень катагенетического преобразования органического вещества (по отражательной способности витринита в воздухе) пород древнее раннепермского возраста соответствует прото- и мезокатагенезу ($\text{MK}_1\text{—MK}_5$ при $R^a > 7.0$) [8, 21].

Йодобромные промышленные воды, содержащие полезные компоненты в концентрациях, превышающих условные предельные значения при их одновременном извлечении $\text{Br} \geq 200$ и $\text{I} \geq 10$ мг/л [2], определены в 235 точках наблюдения в ВК $\text{O}_2\text{-S-D}_1$ -, $\text{D}_3\text{-C}_1$ - и C-P_1 -отложений в пределах всей площади на глубинах свыше 2000 м (рис. 4, 8). В качестве минимальных промышленных концентраций для выделения месторождений промышленных вод Тимано-Печорского бассейна Г. П. Лысенин с соавторами (1969) предложили при их совместном извлечении использовать значения брома — 440 мг/л, йода — 10 мг/л. И в 90 точках опробования рассолы Хорейверской впадины соответствуют таким требованиям. Эти подземные йодобромные промышлен-

* Составление прогнозной карты эксплуатационных ресурсов йодобромных вод и других микроэлементов вод нефтяных месторождений (Территория Коми АССР и Ненецкого национального округа Архангельской области): Отчёт / Г. П. Лысенин, А. Н. Осинников, О. А. Солнцев, Г. Ф. Муранова. Ухта, ВНИИГАЗ Коми филиал, 1969 г. ТФИ РК, инв. № 06908

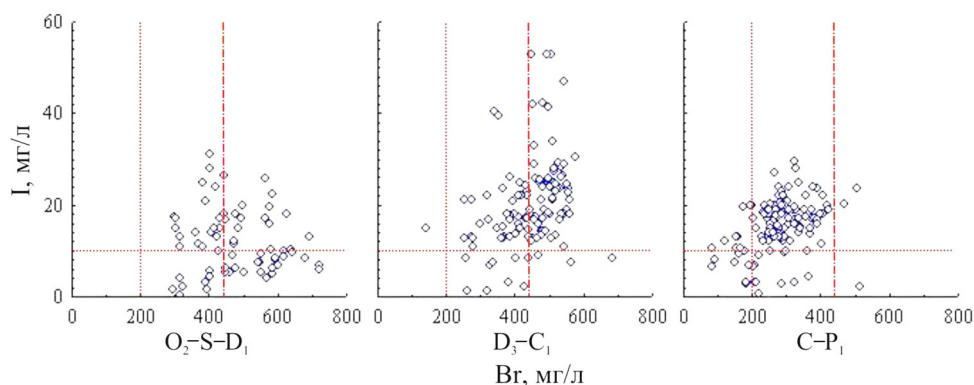


Рис. 8. Диаграммы рассеяния содержаний йода и брома в водоносных комплексах. Линии на графиках показывают промышленные концентрации при совместном их извлечении: йод (10 мг/л) и бром (200 и 440 мг/л)

Fig. 8. Scatter diagrams of iodine and bromine contents in the aquifers. The lines on plots show industrial concentration at companion extraction: iodine (10 mg/l) and bromine (200 and 440 mg/l)

ные воды имеют минерализацию свыше 145 г/л, распространены на глубинах более 2600 м и большей частью являются рассолами D_3-C_1 ВК (рис. 7). С. С. Бондаренко и др. [2] рекомендовано использовать в качестве ориентировочных кондиционных требований к месторождениям подземных йодобромных вод Тимано-Печорского бассейна промышленных вод условия: $Br \geq 760$ мг/л и $I \geq 14$ мг/л. В пределах Хорейверской впадины только рассолы нижнесреднеордовикских отложений скважины 12-Среднемакарихинская, опробованные в интервале глубин 4360–4505 м, при таких условиях могут считаться месторождением промышленных йодобромных вод.

Бор в рассолах Хорейверской впадины. Содержания бора (при величине $pH < 8$ существует в виде ортоборной кислоты H_3BO_3) в подземных водах впадины невысоки — менее 170 мг/л (медиана — 57 мг/л) (табл. 1, рис. 5, 9). Концентрации бора свыше 250 мг/л, позволяющие считать их борными промышленными водами, не выявлены ни в одной скважине. Необходимо отметить, что определения бора выполнены только для 56 % исследованных пластовых вод.

В целом для Хорейверской впадины наблюдается повышение концентраций бора с увеличением глубины опробования рассолов и минерализации (рис. 9). Бор также показал сильные положительные ($r_s > 0.7$) связи с калием и бромом (табл. 3) и заметные ($0.5 < r_s < 0.7$) — с литием, кальцием, хлором, натрием. Распределение бора в хлоридных водах контролируется литолого-геохимическими особенностями водовмещающих толщ и тесно связано с соленостью вод бассейна седиментации [4], эпигенетическими изменениями. Об этом свидетельствует отрицательная связь (табл. 3) бора со значениями хлорбромного коэффициента. В морских осадках бор находится преимущественно в глинистых минералах и концентрируется в органическом веществе. В процессе метаморфизации под влиянием температуры и давления в результате разрушения металлоорганических комплексов, кристаллохимических перестроек глинистых минералов, сопровождаемых изменением (снижением) обменной емкости [4, 9], бор переходит из связанного состояния в подвижное и скапливается в пластовых водах. Поскольку бор относится к летучим элементам, часть его может теряться в длительном процессе геологического развития территории при отсутствии экрани-

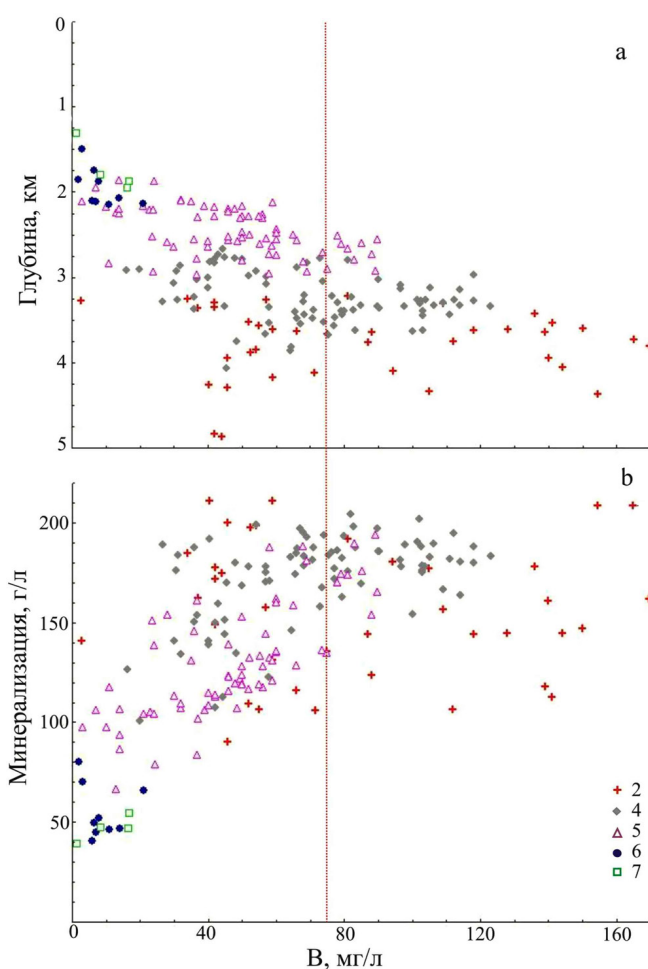


Рис. 9. Содержания бора в водоносных комплексах Хорейверской впадины в зависимости от глубины опробования подземных вод (а) и величины минерализации вод (б). Линии на графиках показывают промышленные концентрации: $B = 75$ мг/л. Условные обозначения — см. рис. 6

Fig. 9. Boron content in the aquifers of the Khoreyver depression depending on depth of occurrence of the underground waters (a) and of mineralization of waters (b). Lines on plots show industrial concentration: $B = 75$ mg/l. Symbols — see Fig. 6

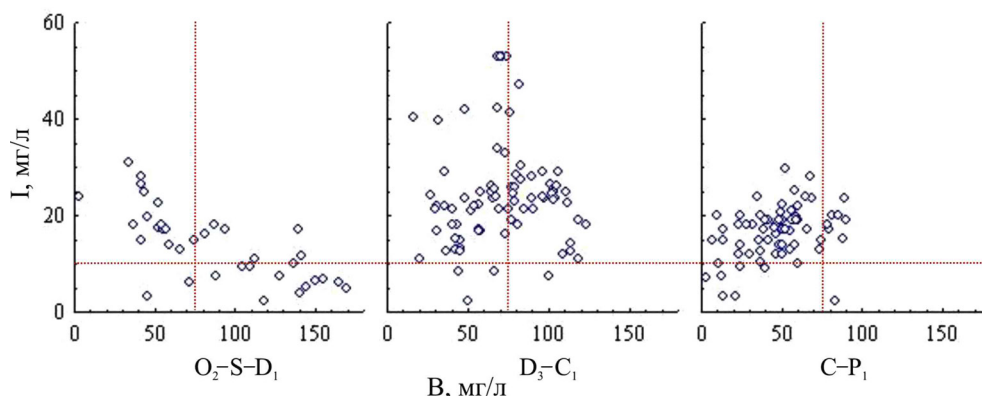


Рис. 10. Диаграммы рассеяния содержаний йода и бора в водоносных комплексах. Линии на графиках показывают минимальные промышленные концентрации при совместном их извлечении: $I = 10$ мг/л, $B = 75$ мг/л

Fig. 10. Scatter diagrams of iodine and boron concentrations in the aquiferous complexes. The lines on plots show industrial concentrations at companion extraction: $I = 10$ mg/l, $B = 75$ mg/l

рующих толщ. И наблюдаемые более высокие концентрации бора в ВК O_2-S-D_1 -отложений Хорейверской впадины (рис. 5) частично можно объяснить залеганием этих пластовых вод под региональным тиманско-саргаевским флюидоупором.

Йодоборные промышленные воды должны иметь концентрации полезных компонентов при их одновременном извлечении: $I \geq 10$ и $B \geq 75$ мг/л. Такие установлены в 52 точках наблюдений в карбонатных комплексах пород ордовика — перми (рис. 5, 10). Эти рассолы с минерализацией 106—204 г/л при глубине залегания свыше 2.5 км содержат также и промышленные концентрации брома (339—619 мг/л).

Для бороносности вод благоприятны повышенные содержания йода в пластовых водах нефтегазовых структур платформенных областей [23]. Однако, по имеющимся в нашем распоряжении данным по рассолам Хорейверской впадины, такой однозначный вывод получить не представляется возможным. На рисунке 10 показаны связи между $I-B$ по трем перспективным комплексам: для ВК O_2-S-D_1 можно видеть их обратно пропорциональную зависимость, для ВК $C-P_1$ — прямую.

Наибольшее распространение йодоборных вод зафиксировано в ВК D_3-C_1 -отложений (рис. 10), область кондиционных рассолов охватывает Центрально-Хорейверский выступ и северную часть Сандивейского поднятия. В пределах ВК O_2-S-D_1 -отложений рассолы с содержанием бора свыше 75 мг/л занимают центральную часть Хорейверской впадины. Однако только в отдельных скважинах Сандивейского поднятия (300-Лыдушорская, 85-Яромусьюшорская, 206-Верхневозейская, 31-Веяжская и 1-В. Ярокутавожская) и в скважине 5-Варкнавтская (рис. 5, а) рассолы могут быть отнесены к йодоборным. Водоносный комплекс $C-P_1$ -отложений также только по единичным площадям (42-Ошкотынская, 40-В. Помолесьшорская, 1-Колвависовская, 68-Мусьюшорская, 32-Мадагашорская и 55-Малохатахская) может быть перспективен на наличие йодоборных промышленных вод.

Литиеносные промышленные воды. Концентрация лития в рассолах палеозойских карбонатных комплексов Хорейверской впадины достигает 45 мг/л (табл. 1, рис. 11, 12). Максимальные (свыше 40 мг/л) количества этого редкого щелочного элемента выяв-

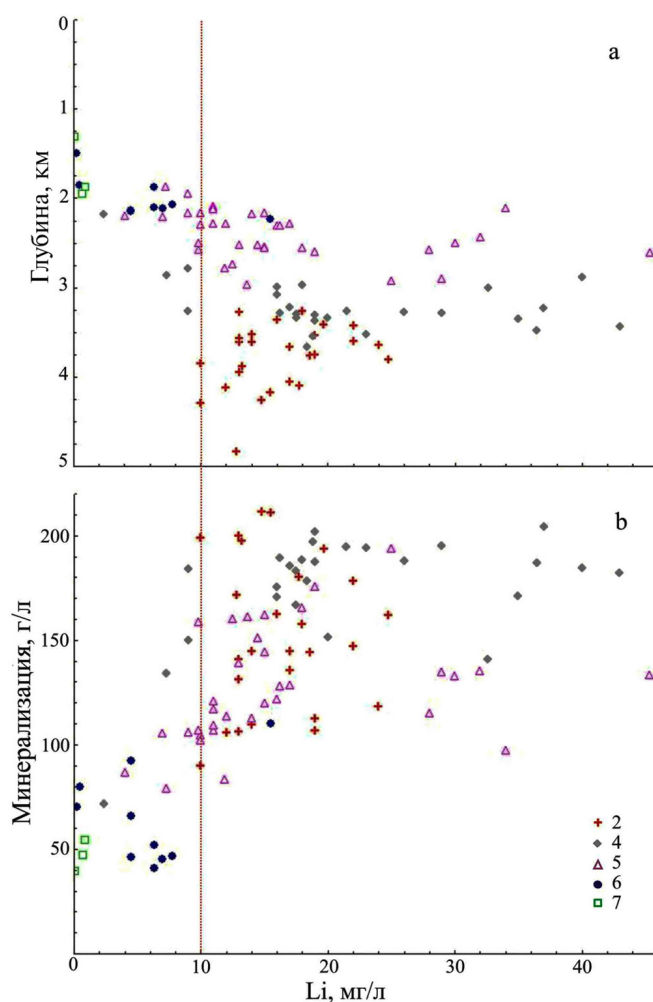


Рис. 11. Содержания лития в водоносных комплексах Хорейверской впадины в зависимости от глубины опробования подземных вод (а) и величины минерализации вод (б). Линии на графиках показывают промышленные концентрации: $Li = 10$ мг/л. Условные обозначения — см. рис. 6

Fig. 11. Lithium concentration in the aquifers of the Khoreyver depression, depending on the depth of occurrence of the underground waters (а) and of mineralization of waters (б). The lines on plots show industrial concentration: $Li = 10$ mg/l. Symbols — see Fig. 6

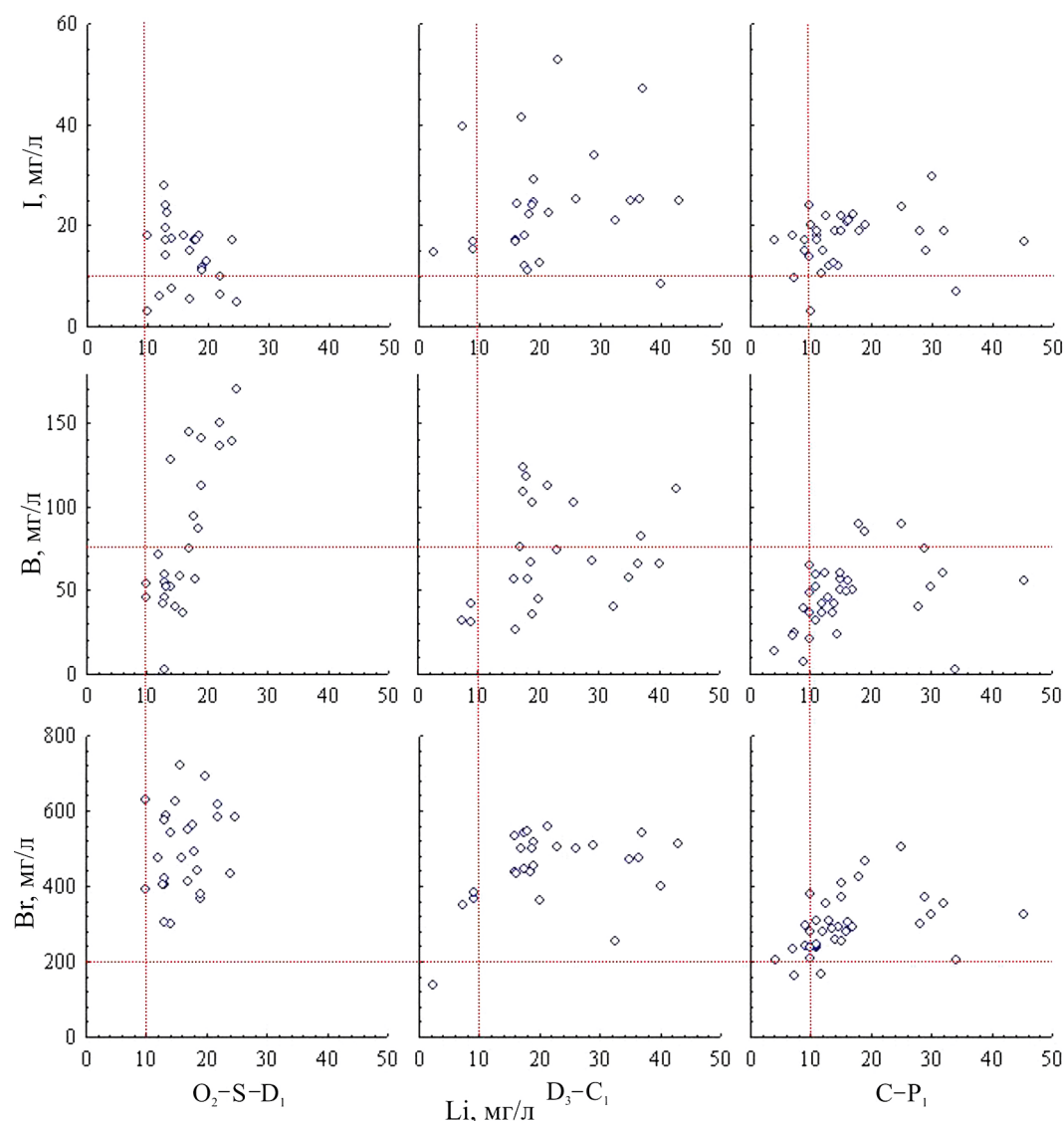


Рис. 12. Зависимости содержаний лития и йода, бора, брома в водоносных комплексах. Линии на графиках показывают минимальные промышленные концентрации при совместном извлечении: $\text{Li} = 10 \text{ мг/л}$, $\text{I} = 10 \text{ мг/л}$, $\text{B} = 75 \text{ мг/л}$, $\text{Br} = 200 \text{ мг/л}$

Fig. 12. Scatter diagrams of lithium and iodine, boron, bromine concentrations in the aquiferous complexes. The lines on plots show minimum industrial concentrations at companion extraction: $\text{Li} = 10 \text{ мг/л}$, $\text{I} = 10 \text{ мг/л}$, $\text{B} = 75 \text{ мг/л}$, $\text{Br} = 200 \text{ мг/л}$

лены в рассолах ВК C-P_1 и $\text{D}_3\text{-C}_1$ на Ошкотынской, Верхнеколвинской и Восточно-Хорейверской площадях Садаггинской ступени и Центрально-Хорейверского уступа. Содержания $\text{Li} > 10 \text{ мг/л}$, при которых подземные воды являются литиеносным гидроминеральным сырьем, были выявлены в 77 точках наблюдений на глубинах свыше 2.1 км при минерализации вод 83–210 г/л. Концентрации других ценных элементов в этих рассолах, представляющих интерес для комплексного извлечения, составляют: бром — 165–720 мг/л, йод — 3–53 мг/л, бор — 3–170 мг/л. Кондиционные содержания Li в рассолах по площади впадины показаны на рисунках 4 и 5 соответственно. К литиеносным относятся йодобромные и в меньшей степени йодоборные рассолы (рис. 12) различных площадей всех исследованных карбонатных комплексов.

Источником лития в рассолах служат морские седиментационные воды и водовмещающие породы, содержащие глинистые минералы, слюды, глауконит, вулканические стекла и др. [9, 19]. Содержания лития

возрастают с ростом степени метаморфизации и минерализации пластовых вод (рис. 11, b), особенно хорошо эта связь прослеживается на примере рассолов $\text{D}_3\text{-C}_1$ и C-P_1 ВК. Наблюдается прямо пропорциональная зависимость ($0.5 < r_s < 0.7$) лития также с концентрациями калия, натрия, кальция, хлора, брома, бора и глубиной залегания (табл. 3, рис. 11, 12). Температурные условия (более 40–60 °С), высокая минерализация вод и низкие значения хлорбромного коэффициента, указывающие на высокую степень преобразований системы «вода — порода», благоприятны для перехода и накопления лития в пластовых водах. Повышенные концентрации лития в ВК $\text{D}_3\text{-C}_1$ и C-P_1 могут быть связаны с поступлением элизионных вод из смежных терригенных тиманско-саргаевских ($\text{D}_3\text{tm-sr}$), нижнекаменноугольных ($\text{C}_1\text{v+C}_1\text{s}$) и нижнепермских ($\text{P}_1\text{ar-P}_1\text{k}$) отложений.

Стронциеносные промышленные воды. Содержание стронция, традиционно относимого к редким металлам, изменяется в значительном диапазоне —

от 49 до 1080 мг/л (табл. 1, рис. 13), значение медианы равно 402 мг/л. В 73 точках наблюдения концентрации стронция превышают 300 мг/л, и рассолы ВК карбонатных O_2-S-D_1 , D_3-C_1 , $C-P_1$ Хорейверской впадины (рис. 4, 5) и терригенных P_{1-2} -отложений Сандивейского поднятия можно считать стронциеносными промышленными. Эти рассолы большей частью являются также и литиеносным гидроминеральным сырьем (для 60 проб $Li \geq 10$ мг/л) (рис. 4, 5, 13), однако корреляционной связи между этими элементами не выявлено. Максимальные (более 1000 мг/л) значения стронция содержатся в пластовых водах ВК $C-P_1$ -отложений в центральной части впадины (скважины 1-В. Мусюшорская, 1-Сюрхаратинская). Из матрицы коэффициентов корреляции видно (табл. 3), что стронций имеет статистически значимую заметную положительную связь с магнием ($r_s = 0.52$). Корреляции Sr с другими параметрами слабые. Однако по отдельным комплексам наблюдаются прямо пропорциональные зависимости между компонентом и величиной минерализации, кальцием, бромом и отрицательная связь с сульфат-ионом, особенно четко они прослеживаются в рассолах ВК O_2-S-D_1 ВК.

Стронций является геохимическим аналогом кальция, тесно связан с морскими карбонатными и сульфатными отложениями. Поскольку Sr имеет большую, чем кальций и магний, способность к сорбционным и ионообменным процессам [9], он лучше сорбируется глинистыми образованиями в условиях седиментации и способен при эпигенезе выделяться в пластовые воды. На глубинах более 2 км в толще пород существует благоприятная обстановка для протекания вторичных процессов — доломитизации, образования ангидрита (гипса) и др., пластовые воды при этом теряют стронций. С этим, вероятно, и связано меньшее содержание Sr в наиболее глубоко залегающих водоносных комплексах (рис. 13). Метаморфизация седиментационных богатых стронцием морских вод, разнонаправленные эпигенетические процессы приводят в целом к формированию йодобромных и в меньшей степени йодобромных рассолов палеозоя с кондиционными содержаниями стронция в пределах отдельных скважин всей Хорейверской впадины.

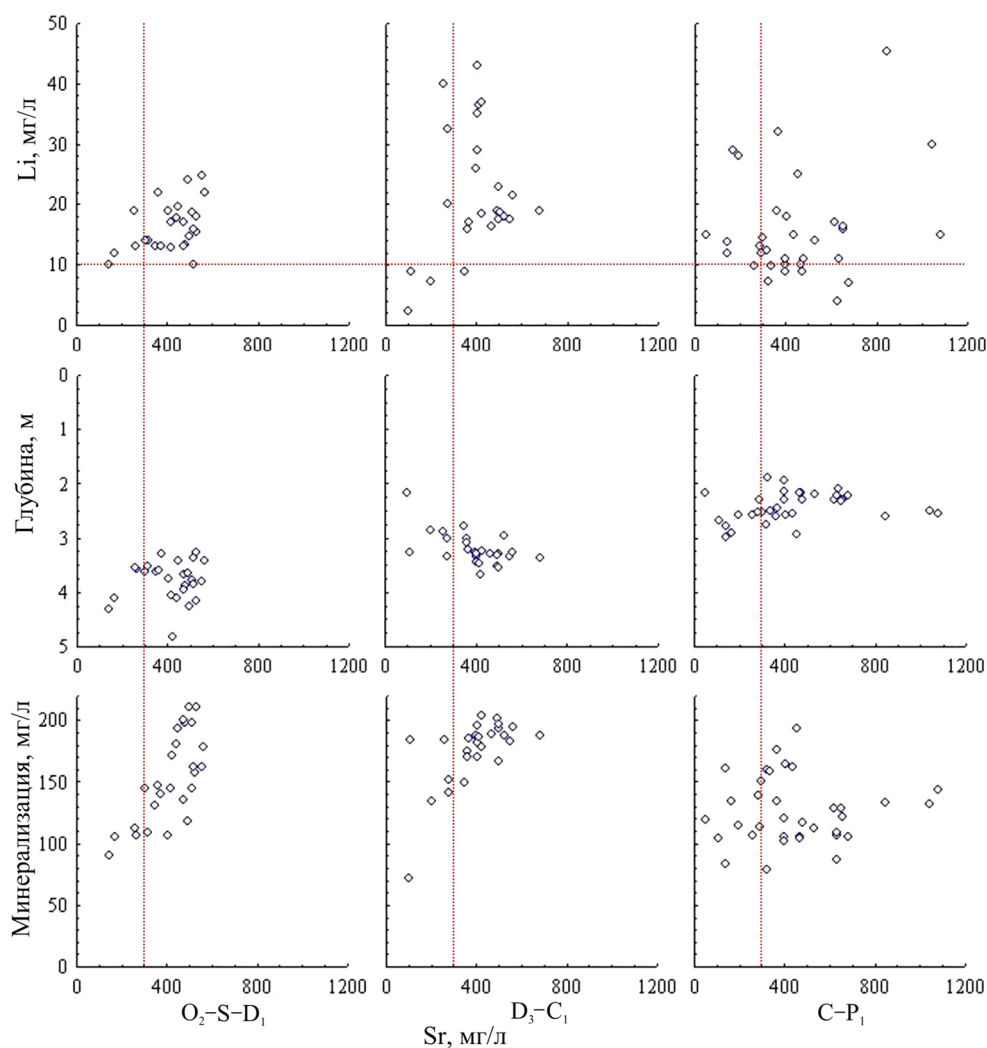


Рис. 13. Зависимости содержания стронция в водоносных комплексах Хорейверской впадины от концентраций лития, глубины опробования подземных вод и величины минерализации. Линии на графиках показывают минимальные промышленные концентрации: $Li = 10$ мг/л, $Sr = 300$ мг/л

Fig. 13. Scatter diagrams of the strontium concentration from content of lithium, the depth of occurrence of underground waters and mineralization in the aquiferous complexes of the Khoreyver depression. Lines on plots show minimum industrial concentrations: $Li = 10$ mg/l, $Sr = 300$ mg/l



Выводы

Проведенные исследования подтвердили высокую перспективность Хорейверской впадины Хорейверско-Печороморской синеклизы на наличие поликомпонентных (Br, I, B, Sr, Li) промышленных вод. Выполненный анализ распределения полезных компонентов в рассолах осадочного чехла впадины позволил выявить перспективные площади и отдельные скважины, рассолы которых удовлетворяют требованиям к промышленным Li–Sr-йодобромным и Li–Sr-йодоборным водам, рекомендуемым нами для комплексного извлечения ценных компонентов (табл. 4, рис. 1, 4, 5). Эти пластовые хлоридные рассолы обогащены также макроэлементами (Na, Ca, Mg, K) в концентрациях $n \sim 10$ г/л. Йодобромные литие- и стронциеносные рассолы выявлены во всех ВК нижнего палеозоя в 55 точках наблюдения.

Гидрохимические исследования позволили выделить площади с Li–Sr-йодоборными кондиционными водами (табл. 4), которые также являются и йодобромными промышленными водами. Поскольку при прогнозной оценке ресурсов перспективных площадей редкометалльных вод необходимо учитывать такие граничные показатели, как глубина залегания водоносного комплекса ≥ 3000 – 3500 м и коэффициент водопроводимости $km \geq 1$ – 20 м²/сут [2], особого внимания в пределах Хорейверской впадины заслуживают рассолы ВК С–P₁-отложений Сандивейского поднятия (табл. 4, рис. 1), залегающие на глубинах менее 3 км, в хорошо изученных в процессе геолого-разведочных работ районах с наиболее развитой нефтедобывающей инфраструктурой. Перспективность южной части Хорейверской впадины отмечалась и ранее [14, 17].

Несмотря на глубокое залегание пластовых хлоридно-натриевых поликомпонентных промышленных рассолов, развитие новых технологий извлечения элементов и приемов переработки гидроминерального сырья позволит в дальнейшем извлекать ценные компоненты из карбонатных ВК палеозоя в промышленных масштабах, в том числе при комплексном освоении месторождений углеводородного и гидроминерального сырья.

Авторы благодарят И. О. Машина за компьютерные картографические построения.

Литература

1. Анциферов А. С. Ресурсы уникальных хлоридных кальциевых рассолов Сибирской платформы и проблемы их промышленного освоения // Разведка и охрана недр. 2004. № 8–9. С. 30–32.
2. Бондаренко С. С., Куликов Г. В. Подземные промышленные воды. М.: Недра, 1984. 358 с.
3. Бураков Ю. Г., Лысенин Г. П. и др. Южный купол Вуктыльского месторождения — нетрадиционный источник энергетических ресурсов, углеводородного и гидроминерального сырья // Геология и разработка газовых месторождений: Сб. науч. тр. (по материалам науч.-практ. конф., посвящ. 90-летию со дня рождения профессора В. М. Сенюкова, г. Ухта, 1997 г.). ИРЦ «Газпром», 1998. С. 172–179.
4. Валяшко М. Г., Поливанова А. И., Жеребцова И. К., Меттих Б. И., Власова Н. К. Геохимия и генезис рассолов Иркутского амфитеатра. М.: Наука, 1965. 160 с.
5. Вахромеев А. Г. Месторождения промышленных поликомпонентных рассолов глубоких горизонтов гидроминеральной провинции Сибирской платформы // Вестник ИРГТУ. 2014. № 9 (92). С. 73–78.
6. Виноградов А. П. Йод в морских илах // Тр. Биогеохим. лаб. АН СССР. Т. 5. 1939. С. 19.
7. Вожов В. И. Подземные воды и гидроминеральное сырье Лено-Тунгусской нефтегазоносной провинции. Новосибирск: СНИИГТИМС, 2006. 209 с.
8. Данилевский С. А., Склярова З. П., Трифачев Ю. М. Геофлюидальные системы Тимано-Печорской провинции. Ухта, 2003. 298 с.
9. Крайнов С. Р., Рыженко Б. Н., Швеиц В. М. Геохимия подземных вод: Теоретические, прикладные и экологические аспекты. М.: Наука, 2004. 677 с.
10. Красинцева В. В. Гидрогеохимия хлора и брома. М.: Наука, 1968. 196 с.
11. Кудельский А. В. Гидрогеология и гидрогеохимия йода. Минск: Наука и техника, 1976. 216 с.
12. Ланина Т. Д., Литвиненко В. И., Варфоломеев Б. Г. Процессы переработки пластовых вод месторождений углеводородов. Ухта: Ухтин. гос. техн. ун-т, 2006. 172 с.
13. Митюшева Т. П., Амосова О. Е. Применение факторного анализа при изучении подземных промышленных йодобромных вод Тимано-Североуральского региона // Вода: химия и экология. 2013. № 9. С. 78–86.
14. Подземные воды Европейского Северо-Востока СССР / Дедеев В. А., Зытнер Ю. И., Оберман Н. Г., Мигунов Л. В., Мильков В. М., Горбачев А. Ф., Руфов С. Б. Сыктывкар: Ин-т геологии Коми НЦ УрО АН СССР. 1989. 160 с.
15. Прищепина О. М., Богацкий В. И., Макаревич В. Н., Чумакова О. В. Новые представления о тектоническом и нефтегазогеологическом районировании Тимано-Печорской нефтегазоносной провинции // Нефтегазовая геология. Теория и практика. Т. 6. № 4. 2011. URL: http://www.ngtp.ru/rub/4/40_2011.pdf (дата обращения: 05.09.2017).
16. Промышленные рассолы Сибирской платформы: гидрогеология, бурение и добыча, переработка, утилизация / Алексеев С. В., Вахромеев А. Г., Коцупало Н. П., Рябцев А. Д. Иркутск: Географ, 2014. 162 с.
17. Руфов С. Б., Мильков В. М. Прогнозная оценка промышленных вод Хорейверской впадины // Геология и минерально-сырьевые ресурсы Европейского Северо-Востока: природные углеводороды. Сыктывкар, 1991. С. 226–229. (Тр. XI геолог. конф. Коми АССР).
18. Серебряков О. И. Перспективы развития минерально-сырьевой базы на Астраханском ГКМ // Развитие и освоение нефтяных и газоконденсатных месторождений. 2003. Вып. 4. С. 79–82.
19. Солодов Н. А., Балашев Л. С., Кременецкий А. А. Геохимия лития, рубидия и цезия. М., 1980. 233 с.
20. Тектоника Тимано-Печорской нефтегазоносной провинции: Объяснительная записка к структурно-тектонической карте Тимано-Печорской нефтегазоносной провинции. М-б 1:1000 000. Сыктывкар: Коми НЦ УрО РАН, 1989. 28 с.
21. Тимано-Печорский седиментационный бассейн: Объяснительная записка к Атласу геологических карт / Под ред. З. В. Ларионовой, В. И. Богацкого. Ухта: Изд-во ТП НИЦ, 2002. 122 с.
22. Шестов И. Н., Шувалов В. М. Минеральные лечебные и промышленные воды Пермского края // Геология и полезные ископаемые Западного Урала / Пермский гос. нац. иссл. ун-т. Пермь, 2013. С. 126–129.

Таблица 4. Подземные воды Хорейверской впадины, относящиеся к редкометалльным (Li, Sr) йодоборным-йодобромным промышленным водам

Table 4. Ground waters of the Khoreyver depression classified as rare metal (Li, Sr) iodine-boron-iodine-bromine industrial waters

Перспективная площадь (или скважина, номер) Potential area (or well, number)	Интервал опробования ВК, м AC Testing interval, m	Минерализация вод, г/л Water minerali- zation, g/l	Содержания, мг/л / Contents, mg/l								
			Br	I	B	Li	Sr	Na	K	Ca	Mg
Минимальные промышленные концентрации элементов (при одновременном извлечении) [1] / Minimal industrial concentrations of elements (simultaneous recovery)			200	10	75	10	300	–	–	–	–
Водоносный комплекс C–P ₁ -отложений / Aquiferous complex of C–P ₁ -sediments											
Малохатояхская, 55 Malokhatoyakhskaya, 55	2563–2602	165.0	424.00	19.00	89.7	18.0	405.0	48330.0	1075.0	11222.0	1946.0
Колвависовская, 1 Kolvavisovskaya, 1	2599–2629	175.0	467.42	20.09	85.26	19.0	364.0	51880.9	1240.0	11600.0	1884.8
Ошкотынская Oshkotynskaya	2630–2939	133.0–193.5	322.3– 506.2	16.9–23.7	55.3–89.2	25.0–45.3	452.3– 845.5	36880.3– 57660.5	638.9– 1600.0	8416.8– 13426.8	1215.0– 2308.5
Водоносный комплекс D ₃ –C ₁ -отложений / Aquiferous complex of D ₃ –C ₁ -sediments											
Шор-Сандивейская, 70 Shor-Sandiveyskaya, 70	2968–3012	188.0	545.00	11.00	118.0	18.0	525.0	40430.0	1670.	13100.0	1763.0
Северо-Хоседаюская Severo-Khosedayuskaya	3210–3502	181.4–205.0	446.2– 544.00	41.5–47.00	68.3–82.0	17.0–37.0	364.0– 425.0	52400.0– 60000.0	1710.0– 1950.	10497.0– 12470.0	1649.9– 2122.0
Южно-Сюрхаратин- ская, 10 / Yuzhno- Syurkharatinskaya, 10	3265–33429	178.7–194.3	519.5– 556.78	22.7–23.1	103.0– 112.18	21.5	562.9	50800.0– 56360.0	2216.0– 2378.0	11623.2– 12024.0	1944.0– 2673.0
Верхнеколвинская Verkhnekolvinskaya	3271–3500	186.0–188.0	499.5– 514.0	25.4–25.0	102.6– 111.0	26.0–43.0	395.0– 402.0	51300.0– 55380.0	2318.0– 2378.0	12697.0– 11663.0	1684.0– 2121.0
Сюрхаратинская Syurkharatinskaya	3285–3560	188.8–202.0	431.6– 517.00	24.0–24.5	67.1–102.2	16.3–19.0	465.0– 501.9	55600.4– 60000.0	1487.8– 2102.8	11824.0– 12424.8	1215.0– 2552.0
Мусюшорская Musyushorskaya	3301–3349	167.0–182.7	447.0– 542.5	12.0–17.9	109.0– 123.0	17.5	500.0– 550.0	48711.0– 53824.1	1730.0– 1770.0	11600.0– 12000.0	1581.0– 2188.8
Водоносный комплекс O ₂ –S–D ₁ -отложений / Aquiferous complex of O ₂ –S–D ₁ -sediments											
Восточно-Ярокутовож- ская, 1 / Vostochno- Yarokutovozhskaya, 1	3375–3429	177.0	619.00	10.00	136.0	22.0	563.0	49338.0	2800.0	12650.0	2523.0
Яромусюршорская, 85 Yaromysyurshorskaya, 85	3647–3830	106.0–122.0	381.0– 433.0	11.0–17.0	112.0– 139.0	19.0–24.0	402.0– 492.0	30038.0– 33479.0	1420.0– 1530.0	7700.0– 8350.0	1094.0– 1398.0
Лыдошорская, 300 Lydoshorskaya, 300	3666–3763	135.0–144.0	414.0– 443.0	15.0–18.0	75.0–87.0	17.0–18.6	471.0– 509.0	39233.0– 42042.0	1470.0– 1560.0	9068.0– 9619.0	1490.0– 1520.0
Варкнавтская, 5 Varknavtskaya, 5	4103–4110	180.2	564.77	17.26	94.34	17.6	441.7	53700.5	2482.9	9619.2	1701.0



23. Шербаков А. В. Гидрогеохимические исследования при поисках и разведке подземных бороносных вод. М.: Госгеолтехиздат, 1961. 128 с.

References

- Anciferov A. S. *Resursy unikalnyh hloridnyh kal'cievyh rassolov Sibirskoj platformy i problemy ih promyshlennogo osvoenija* (Resources of unique calcium chloride brines of the Siberian platform and problems of their industrial development). *Razvedka i ohrana nedr* (Exploration and protection of subsoil), 2004, No. 8–9, pp. 30–32.
- Bondarenko S. S., Kulikov G. V. *Podzemnye promyshlennye vody* (Underground industrial water). Moscow: Nedra, 1984, 358 p.
- Burakov Ju. G., Lysenin G. P. et al. *Juzhnyj kupol Vuktylskogo mestorozhdenija — netradicionnyj istochnik jenergeticheskikh resursov, uglevodorodnogo i gidromineral'nogo syrja* (The southern dome of the Vuktyl field is an unconventional source of energy resources, hydrocarbon and hydromineral raw materials). Proceedings of conference, Ukhta, 1997. Gazprom, 1998, pp. 172–179.
- Valjashko M. G., Polivanova A. I., Zherebcova I. K., Mettikh B. I., Vlasova N. K. *Geohimija i genezis rassolov Irkutskogo amfiteatra* (Geochemistry and genesis of brines of the Irkutsk amphitheater). Moscow: Science, 1965, 160 p.
- Vahromeev A. G. *Mestorozhdeniya promyshlennykh polikomponentnykh rassolov glubokih gorizontov gidromineralnoj provincii Sibirskoj platformy* (Deposits of industrial multicomponent brines of deep horizons of the hydromineral province of the Siberian platform). *Vestnik of Ir STU*, 2014, No. 9 (92), pp. 73–78.
- Vinogradov A. P. *Jod v morskikh ilah* (Iodine in sea silts). Proceedings of the Biogeochemical Laboratory of the USSR Academy of Sciences, 1939, V. 5, p. 19.
- Vozhov V. I. *Podzemnye vody i gidromineralnoe syre Leno-Tunguskoj neftegazonosnoj provincii* (Groundwaters and hydromineral raw materials of the Leno-Tunguska oil and gas province). Novosibirsk: SNIIGiMS, 2006, 209 p.
- Danilevskij S. A., Skljarkova Z. P., Trifachev Ju. M. *Geofluidalnye sistemy Timano-Pechorskoj provincii* (Geofluidic systems of the Timan-Pechora province). Uhta, 2003, 298 p.
- Krajnov S. R., Ryzhenko B. N., Shvec V. M. *Geohimija podzemnykh vod. Teoreticheskie, prikladnye i jekologicheskie aspekty* (Geochemistry of underground waters. Theoretical, applied and environmental aspects). Moscow: Science, 2004, 677 p.
- Krasinceva V. V. *Gidrogeohimija hlora i broma* (Hydrogeochemistry of chlorine and bromine). Moscow: Science, 1968, 196 p.
- Kudel'skij A. V. *Gidrogeologija i gidrogeohimija joda* (Hydrogeology and hydrogeochemistry of iodine). Minsk: Nauka i tehnika Publ., 1976, 216 p.
- Lanina T. D., Litvinenko V. I., Varfolomeev B. G. *Processy pererabotki plastovykh vod mestorozhdenij uglevodorodov* (Processes of processing of aquifers of hydrocarbon deposits). Uhta: UGTU, 2006, 172 p.
- Mitjusheva T. P., Amosova O. E. *Primenenie faktornogo analiza pri izuchenii podzemnykh promyshlennykh jodobromnykh vod Timano-Severouralskogo regiona* (Application of factor analysis in the study of underground industrial iodine-bromine waters of the Timan-North Ural region). *Voda: himija i jekologija* (Water: chemistry and ecology), 2013, No. 9, pp. 78–86.
- Podzemnye vody Evropejskogo Severo-Vostoka SSSR* (Underground waters of the European North-East of the USSR). Dedeev V. A., Zytner Ju. I., Oberman N. G., Migunov L. V., Milkov V. M., Gorbachev A. F., Rufov S. V. Syktyvkar: Institute of geology of the Komi SC UB of the USSR Academy of Sciences, 1989, 160 p.
- Prishhepa O. M., Bogackij V. I., Makarevich V. N., Chumakova O. V. *Novye predstavlenija o tektonicheskom i neftegazogeologicheskom rajonirovanii Timano-Pechorskoj neftegazonosnoj provincii* (New ideas about the tectonic and oil and gas-geological zoning of the Timan-Pechora oil and gas province). *Neftegazovaja geologija. Teorija i praktika* (Oil and gas geology. Theory and practice), 2011, V. 6, No. 4. URL: http://www.ngtp.ru/rub/4/40_2011.pdf / (accessed: 05.09.2017).
- Promyshlennye rassoly Sibirskoj platformy: gidrogeologija, burenie i dobycha, pererabotka, utilizacija* (Industrial brines of the Siberian platform: hydrogeology, drilling and production, processing, utilization). Alekseev S. V., Vahromeev A. G., Kocupalov N. P., Rjabcev A. D. Irkutsk: Geograf. Publ., 2014, 162 p.
- Rufov S. B., Milkov V. M. *Prognoznaja ocenka promyshlennykh vod Horejverskoj vpadiny* (Predictive estimate of the industrial waters of the Khoreyver depression). *Geologija i mineral'no-syr'e vyve resursy Evropejskogo severo-vostoka: prirodnye uglevodorody* (Geology and Mineral Resources of the European North-East: natural hydrocarbons). Proceedings of conference. Syktyvkar, 1991, pp. 226–229.
- Serebrjakov O. I. *Perspektivy razvitiya mineralno-syrevoj bazy na Astrahanskom GKM* (Prospects for the development of the mineral resource base at the Astrakhan GCF). *Razvitie i osvoenie neftejnykh i gazokondensatnykh mestorozhdenij* (Development and using of oil fields and gas condensate fields). 2003, V. 4, pp. 79–82.
- Solodov N. A., Balashev L. S., Kremeneckij A. A. *Geohimija litija, rubidija i cezija* (Geochemistry of lithium, rubidium, and caesium). Moscow, 1980, 233 p.
- Tektonika Timano-Pechorskoj neftegazonosnoj provincii: Objasnitel'naja zapiska k strukturno-tektonicheskoj karte Timano-Pechorskoj neftegazonosnoj provincii. Masshtab 1:1000 000* (Tectonics of the Timan-Pechora oil and gas province: Explanatory note to the structural and tectonic map of the Timan-Pechora oil and gas province. Scale 1: 1000 000). Syktyvkar: Komi Scientific Center of the Russian Academy of Sciences, 1989, 28 p.
- Timano-Pechorskij sedimentacionnyj bassejn: Objasnitel'naja zapiska k Atlasu geologicheskikh kart* (Timan-Pechora sedimentation basin: Explanatory note to the Atlas of Geological Maps). Eds. Z. V. Larionova, V. I. Bogackii. Uhta: TP NIC Publ., 2002, 122 p.
- Shestov I. N., Shuvalov V. M. *Mineralnye lechebnye i promyshlennye vody Permskogo Kraja* (Mineral curative and industrial waters of Perm Territory). *Geologija i poleznye iskopaemye Zapadnogo Urala* (Geology and minerals of the Western Urals). Perm State University, 2013, pp. 126–129.
- Shherbakov A. V. *Gidrogeohimicheskie issledovaniya pri poiskah i razvedke podzemnykh boronosnykh vod* (Hydrogeochemical studies in the search and exploration of underground boric waters). Moscow: Gosgeoltekhizdat Publ., 1961, 128 p.



Амфиболы высокобарических метабазитов района Слюдяной горки (Полярный Урал, хребет Марун-Кей) из коллекции Геологического музея им. А. А. Чернова

И. С. Астахова, К. С. Попвасев

Институт геологии ФИЦ Коми НЦ УрО РАН, Сыктывкар
astakhova@geo.komisc.ru

Приводятся результаты исследований амфиболов высокобарических метабазитов района Слюдяной горки (Полярный Урал) из коллекции музея. Присутствие в названиях пород устаревших названий амфиболов (каринтин) делает актуальным изучение данной группы минералов. В соответствии с новой номенклатурой минералов уточнена видовая принадлежность амфиболов. Аналитические исследования проводились с помощью оптического и сканирующего электронного микроскопа, рентгеновским и спектроскопическими методами.

В результате проведения детального минералого-петрографического исследования были отмечены амфиболовый апоэклогитовый бластомилонит, эклогитоподобные породы кварц-омфацит-амфибол-кианитового и амфибол-кварц-гранатового состава. В матрице амфиболитового апоэклогитового бластомилонита обнаружен железосодержащий чермакит, в порфиробластах встречены магнезиогорнблендит и барруазит. В кварц-омфацит-амфибол-кианитсодержащей эклогитоподобной породе обнаружен магнезиогорнблендит, в прожилках установлен магнезиотарамит. В амфибол-кварц-гранатовых эклогитоподобных породах обнаружен барруазит и крупнокристаллический магнезиотарамит. Выявленные амфиболы свидетельствуют, что в высокобарических метабазитах могут присутствовать амфиболы разных химических групп.

Ключевые слова: высокобарические метабазиты, минералогия, амфиболы, музей, Слюдяная горка, Полярный Урал.

Amphiboles of high-pressure metabasites of the Mica hill region (Polar Urals, Marun-Keu range) from the collection of A. A. Chernov Geological museum

I. S. Astakhova, K. S. Popvasev

Institute of Geology FRC Komi SC UB RAS, Syktyvkar

The results of studies of amphiboles of high-pressure metabasites of the Mica hill region (Polar Urals) from the museum collection have been presented. The presence of obsolete names of amphiboles (carinthine) in the names of rocks makes the study of this group of minerals relevant. The specific identity of amphiboles was confirmed according to the new nomenclature. The analytical studies were based on optical and scanning electron microscopy, X-ray and spectroscopic methods.

The detailed mineralogical-petrographic researches were resulted in discovery of amphibole apoeclomite blastomylonite, quartz-omphacite-amphibole-kyanite and amphibole-quartz-garnet eclogitoids. Iron-containing tschermakite was found in the matrix of amphibole apoeclomite blastomylonites, magnesiohornblende and barroisite were found in porphyroblasts. Magnesiohornblende was found in quartz-omphacite-amphibole-kyanite-containing eclogitoids, magnesiotaramite was determined in veinlets. Barroisite and large-crystalline magnesiotaramite were found in amphibole-quartz-garnet eclogitoids. The identified amphiboles testify to the fact that amphiboles of different chemical groups may be present in one type of high-pressure metabasites.

Keywords: high-pressure metabasites, mineralogy, amphiboles, museum, Mica hill, Polar Urals.

Введение

Одним из основных центров хранения геологической информации на Европейском Северо-Востоке России является Геологический музей им. А. А. Чернова. В музейных фондах собран минералогический и петрографический материал, характеризующий региональные и локальные закономерности, геодинамические обстановки формирования Полярного Урала. При проведении инвентаризации объектов с петро-

графической информацией были обнаружены образцы с минералом, название которого не значится в общепринятом списке минеральных видов (ИМА, 2014). В образцах, характеризующих эклогитовый комплекс докембрийских толщ марункеуской структуры, Д. Н. Литовко и А. Б. Макеев указали каринтин. На Полярном Урале каринтин был впервые обнаружен и описан Н. Г. Удовкиной в породах Слюдяной горки [5; 11]. Впервые в минералогии каринтин был

Для цитирования: Астахова И. С., Попвасев К. С. Амфиболы высокобарических метабазитов района Слюдяной горки (Полярный Урал, хребет Марун-Кей) из коллекции Геологического музея им. А. А. Чернова // Вестник геонаук. 2021. 8(320). С. 46–54. DOI: 10.19110/geov.2021.8.4.

For citation: Astakhova I. S., Popvasev K. S. Amphiboles of high-pressure metabasites of the Mica hill region (Polar Urals, Marun-Keu range) from the collection of A. A. Chernov Geological museum, 2021, 8(320), pp. 46–54, doi: 10.19110/geov.2021.8.4.



описан С. Коритнигом в экогитах Австралии (1940) и по химизму соответствовал специфической роговой обманке, устойчивой к минералам экогитового парагенезиса.

Группа амфиболов и сегодня является одной из самых сложных в системе минералогии. Четыре катионные и одна анионная видообразующие позиции реализуются в изо- и гетеровалентном изоморфизме, что создает довольно длинный комбинаторный ряд. В 1987 г. была разработана первая номенклатура амфиболов, основанная на кристаллических принципах, в которой задавались граничные условия для разделения минеральных видов [7, 16]. Минерал каринтин не был признан одним из членов изоморфного ряда роговых обманок, однако данный термин закрепился. Накопление новых данных по амфиболам позволило подкомитету по амфиболам КНМНМ ММА разработать классификацию IMA-97, основанную на кристаллохимии амфиболов, и разделить амфиболы на четыре группы: Mg-Fe-Mn-Li-амфиболы с подгруппами — ромбические и моноклинные, а их, в свою очередь, на серии: ромбические — антофиллит, жедрит и холмквистит; моноклинные — кумигтонит-грюнерит и клинохолмквистит. В группах кальциевых, натриево-кальциевых и натриевых амфиболов детальное деление не приводится. В 2003 г. были незначительно пересмотрены параметры, используемые для разделения натриевых амфиболов [14, 17]. Позднее были открыты богатые литием амфиболы, что неизбежно привело к возникновению пятой группы [17]. В настоящее время в группе амфиболов известно более 100 минеральных видов.

В 2004 г. проведена работа по номенклатурному анализу амфиболов Урала и предложена матричная модель, опирающаяся на распределение зарядов и их баланс в соответствии со структурными позициями [2]. В результате на Урале было установлено 54 конечных вида амфиболов. Выявлено, что наиболее распространенными являются амфиболы кальциевой серии, другая часть — менее распространенная, которая обнаруживается в определенных комплексах. В их число вошел и каринтин, который не был достаточно хорошо изучен, а ранее полученные результаты химического анализа Н. Г. Удовкиной позволили исследователям отнести каринтин и к алюмомагнезиотарамиту, и к магнезиогорнблендиту [2]. Широкая вариация состава амфибола в изученных нами образцах объясняется разнообразием пород и условиями формирования марункеуского комплекса.

Краткая характеристика геологического строения района Слюдяной горки

Экогит-перидотит-гнейсовый комплекс хребта Марун-Кеу достаточно детально изучен, однако и сегодня остается много вопросов по геодинамическим обстановкам и условиям формирования, возрасту и времени метаморфических преобразований пород. Он представляет собой тектонический блок, вытянутый в субмеридиональном направлении в зоне Главного Уральского разлома и ограниченный тектоническими контактами с вулканогенно-осадочными образованиями няровейской серии [4, 6, 8, 12]. В геологическом строении марункеуского комплекса участвуют пироповые

и альмандиновые экогиты, гранатовые и плагиоклазовые перидотиты, гранатовые амфиболиты, глаукофановые сланцы, плагиогнейсы и слюдяные сланцы, граниты, разнообразные по составу бластомилониты и мигматиты [10]. В результате проведенных исследований было установлено, что возвышенности представлены многочисленными разрозненными телами перидотитов (горы Перидотитовая, Рыжая) (рис. 1).

Экогиты и апоэкогитовые амфиболиты залегают в виде пластообразных и линзовидных тел, ориентированных согласно с простиранием вмещающих их гнейсов [9]. Экогиты характеризуются полосчатой, гнейсовидной, сланцеватой текстурами. Петрографические исследования экогитсодержащих толщ позволили установить следующую стадийность в смене минеральных парагенезисов [9]. Для пород, претерпевших метаморфизм экогитовой фации, характерен

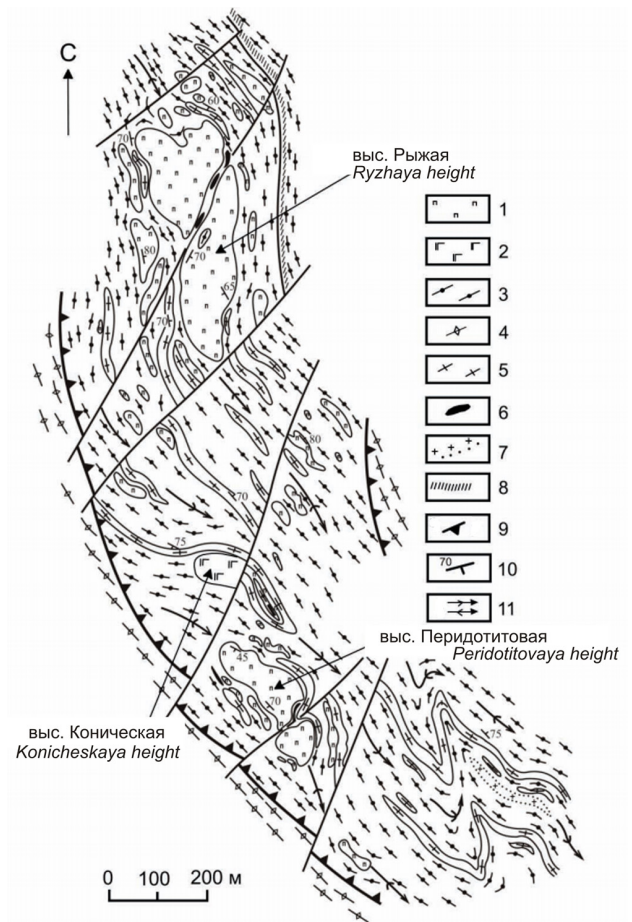


Рис. 1. Схема геологического строения района Слюдяной горки [9]: 1 — метаультрабазиты нерасчлененные, 2 — массивные экогиты с реликтами габбро, 3 — экогиты полосчатые, 4 — амфиболизированные экогиты, апоэкогитовые амфиболиты, 5 — плагиогнейсы, 6 — кварцевые и кварц-полевошпатовые жилы, 7 — гранитизированные породы, 8 — кянитизированные породы, 9 — разрывные нарушения, 10 — элементы залегания, 11 — оси складок

Fig.1. Scheme of the geological structure of the Mica Hill [9]: 1 — undifferentiated metaultrabasic rocks, 2 — massive eclogites with gabbro relics, 3 — banded eclogites, 4 — amphibolized eclogites, apoeclotitic amphibolites, 5 — plagiogneisses, 6 — quartz and quartz-feldspar veins, 7 — granitized rocks, 8 — kyanitized rocks, 9 — discontinuous faults, 10 — bedding elements, 11 — fold axes

парагенезис омфацита и граната. В связи с процессами плагиигранитизации и кислотного выщелачивания и вследствие высокобарической метаморфической дифференциации наряду с гранатом и омфацитом в парагенезисе установлены плагиоклаз и фенгит. С диафторезом амфиболитовой фации связано появление в породах амфибола, граната и плагиоклаза. Ассоциация актинолита, хлорита и альбита характеризует процесс диафтореза зеленосланцевой фации [9].

Некоторые исследователи подчеркивают, что состав минеральных парагенезисов, характеризующих термодинамическую эволюцию образования и преобразования пород, значительно различаются в пределах геологического тела, блока, структуры и устанавливаются лишь в локальных зонах [1]. Так, Н. Г. Удовкина выделила амфиболитовые разности в эклогитовых породах, которые образуются в зонах разлома с гипербазитами и габброидами. В них отмечены жилы двуминеральных мелкозернистых эклогитов с амфиболитовыми оторочками мощностью 1–50 см, по составу отнесенных к каринтину [11].

Таким образом, неоднородность строения комплекса, присутствие переходных разновидностей пород и отсутствие четких границ между ними затрудняют диагностику амфиболов и не дают возможности диагностировать минерал по одному типу пород.

Объекты исследования и методы

Для повторного изучения из коллекций Д. Н. Литошко и А. Б. Макеева были отобраны образцы пород эклогитовой фации района Слюдяной горки. В образцах цоизитового бластомилонита* (672/38) и кварццоизит-амфиболового эклогита (672/35) обнаружен амфибол, диагностированный как каринтин, от темно-зеленого до черного цвета, размер кристаллов достигает 2 см (рис. 2, а). Мелкокристаллические разности амфибола (каринтина?) ранее установлены в эклогите лейкократового омфацит-гранат-амфибол-цоизитового состава (672/1), в амфиболитовом благите по аподиабазовому эклогиту (672/4), жильном амфибол-гранатовом эклогите (672/10).

Минералого-петрографические исследования проводились в ЦКП «Геонаука» ИГ Коми НЦ УрО РАН (Сыктывкар). Рентгеновские исследования велись с применением порошковой дифракции на дифрактометре Shimadzu XRD-6000. Условия съемки: Cu-анод, ток — 30 mA, напряжение — 30 kV, фильтр Ni, шаг сканирования 2θ — 0.05, скорость съемки — 1 гр/мин (аналитик Б. А. Макеев). Регистрация спектров комбинационного рассеяния света (КР) проводилась на спектрометре LabRam HR 800 (Horiba Jobin Yvon) (аналитик С. И. Исаенко). Условия регистрации спектров: решетка монохроматора — 600 ш/мм, конфокальное отверстие — 300 мкм, щель — 100 мкм, время экспозиции — 10 с, количество циклов накопления сигнала — 3, мощность возбуждающего излучения Ar-лазера (488 нм) — 1.2 мВт. Микрозондовые исследования произведены на сканирующем электронном микроскопе

Tescan Vega 3 LMN с энергодисперсионной приставкой X-Max (аналитик Е. М. Тропников).

Результаты исследования. Минералого-петрографические особенности пород

По определению Международной субкомиссии по систематике метаморфических пород, к эклогитам относится метаморфическая горная порода, состоящая из граната и омфацита ($Grt + Omp \geq 75\%$) [18]. Наличие и доля других минералов устанавливают разновидности эклогита. В Петрографическом кодексе (2009) выделен гранат-каринтин-омфацитовый эклогит, содержащий омфацит 30–40 %, каринтин 25–28 %, гранат 10–20 %, глаукофан 10–15 %. В связи с широкими вариациями процентного содержания основных минералов, разнообразием номенклатур эклогитов было повторно проведено минералого-петрографическое изучение амфиболсодержащих пород.

В ранее изученном жильном амфибол-гранатовом эклогите (672/10) отмечается линзовидная текстура, обусловленная выделениями амфибола от 0.1 до 0.5 см и крупными кристаллами кварца (до 0.4 мм). При петрографическом изучении породы установлено, что основная ткань породы имеет преимущественно кварц-гранатовый состав: гранат (50 %), кварц (40 %), амфибол (8 %). В качестве акцессорных минералов выделяются рутил (< 2 %), мусковит (ед. зн.) (рис. 2, а). Структура породы — гранопорфиروبластовая, гломеробластовая, структура основной ткани — гипидиобластовая. Гранат отмечен в виде изометричных идиоморфных и субидиоморфных порфиروبластов (рис. 2, с). Зерна граната расположены кучно, образуя мономинеральные агрегаты, подчеркивающие гломеробластовую структуру. По химическому составу гранат однороден, средний состав минерала ($n = 5$) — $Al_{0.45}Pir_{0.35}Grs_{0.20}Sp_1$ — имеет формулу $(Fe^{2+}_{1.34}Mg_{0.89}Ca_{0.72}Mn_{0.04})_{2.99}Al_{2.00}(Si_{2.98}Al_{0.02})_{3.00}O_{12}$. В составе линз и прослоев обнаружены зерна кварца размером до 2–3 мм, более мелкозернистый кварц встречен в матрице. Амфиболы выделяются в виде порфиробласт неправильной удлиненной формы, содержащие включения кварца, граната, рутила. Из акцессорных минералов в породе можно отметить рутил. Минеральный состав основной ткани ранее описанного кварц-цоизит-амфиболового эклогита (672/35) схож с вышеописанной породой (рис. 2, а). Отличительной особенностью являются жилы гранат-кианит-кварцевого состава с кристаллами амфибола размером до 2 см. В ходе проведения минералого-петрографических исследований цоизит, который присутствует в названии породы (по Д. Н. Литошко, А. Б. Макеева), не был установлен.

В связи с этим согласно систематике метаморфических пород обе породы можно отнести к амфибол-кварц-гранатовым эклогитоподобным породам.

Образец № 672/1, диагностированный Д. Н. Литошко и А. Б. Макеевым как лейкократовый омфацит-гранат-цоизитовый эклогит, представляет собой грязно-белую породу с неравномерно распределенными обособлениями амфибол-пироксен-кианитового состава от темно-зеленого до черного цвета (рис. 3, а). Порода сложена амфиболом (40 %), моноклинным пироксеном (25 %), кварцем (15 %), гранатом (около 12 %), киани-

* Здесь и далее названия пород приведены из описи монографической коллекции № 672 (авторы Д. Н. Литошко, А. Б. Макеев) из фондов Геологического музея им. А. А. Чернова

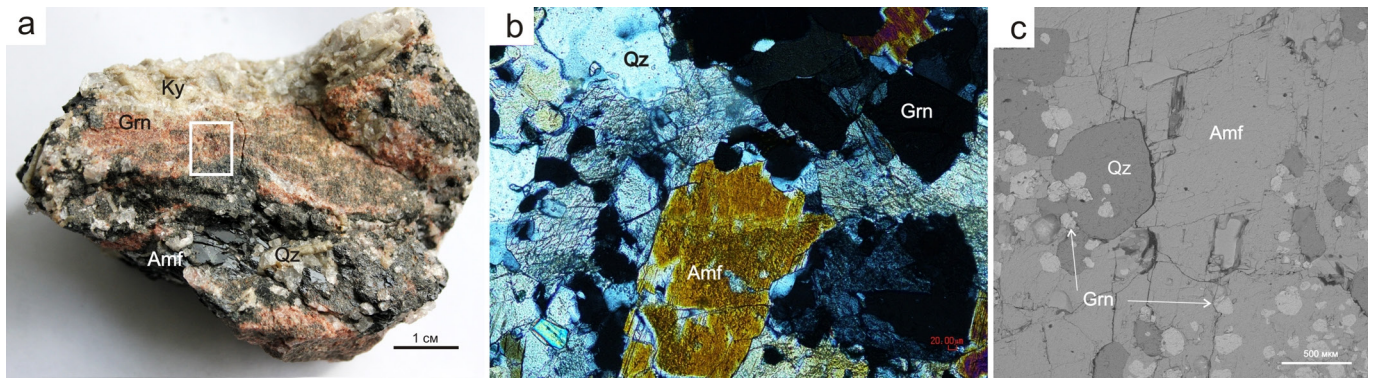


Рис. 2. Минеральная ассоциация амфибол-кварц-гранатовой эклогитоподобной породы: а — обр. 672/35, б — обр. 672/10 (николи X), с — обр. 672/10 (СЭМ-снимок). Обозначения минералов [21]: Qz — кварц, Amp — амфибол, Grt — гранат, Ky — кианит

Fig. 2. Mineral association of the amphibole-quartz-garnet eclogitoids: a — sample 672/35, b — sample 672/10 (Nicol X), c — sample 672/10 (SEM-foto). Mineral designation [21]: Qz — quartz, Amp — amphibole, Grt — garnet, Ky — kyanite

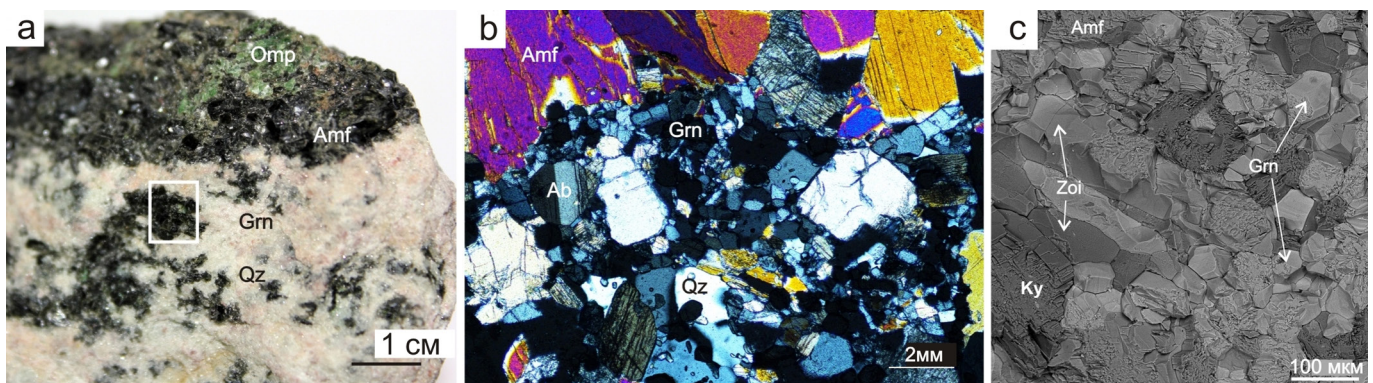


Рис. 3. Минеральная ассоциация кварц-омфацил-амфибол-кианитсодержащей эклогитоподобной породы (обр. 672/1): а, б — николи X, с — СЭМ-снимок. Обозначения минералов [21]: Qz — кварц, Amp — амфибол, Grt — гранат, Ky — кианит, Zo — цоизит, Ab — альбит, Omp — омфацил

Fig. 3. Mineral association of quartz-omphacite-amphibole-kyanite-containing eclogitoids (sample 672/1): a, b — Nicol X, c — SEM-image. Mineral designation [21]: Qz — quartz, Amp — amphibole, Grt — garnet, Ky — kyanite, Zo — zoisite, Ab — albite, Omp — omphacite

том (5 %), цоизитом (3 %), плагиоклазом (ед. зн.). Отмечается порфирогранобластовая структура с элементами гетеробластовой структуры основной ткани (рис. 3, б). Амфиболы представлены в виде таблитчатых и листоватых выделений, реже гипидиоморфными призматическими кристаллами. В некоторых зернах проявляется ситовидная структура вследствие многочисленных включений кварца. Гранат образует идиоморфные зерна размером от 0.5 мм до 1 мм. По химическому составу отвечает $\text{Prp}_{44}\text{Alm}_{35}\text{Grs}_{20}\text{Sp}_{15}$ с общей формулой $(\text{Mg}_{1.33}\text{Fe}^{2+}_{1.04}\text{Ca}_{0.61}\text{Mn}_{0.03})_{3.01}\text{Al}_{2.01}\text{Si}_{2.99}\text{O}_{12}$. Состав граната однороден, зональность не проявлена. В интерстициях между кристаллами граната установлены уплощенные кристаллы кианита с неровными контурами. Микронзондовыми исследованиями в составе кианита $\text{Al}_{1.99}\text{O}(\text{Si}_{0.99}\text{O}_4)$ обнаружены примеси железа (до 0.24 мас. %) и хрома (до 0.4 мас. %). В ассоциации с гранатом, кианитом и амфиболом обнаружены удлиненные кристаллы цоизита с общей формулой $\text{Ca}_{1.92}\text{Fe}_{0.07}(\text{Al}_{2.96}\text{Cr}_{0.01})_{2.97}(\text{Si}_{3.03}\text{O}_{11})(\text{OH})$ (рис. 3, с). Установлены отдельные участки породы, обогащенные короткопризматическими кристаллами моноклинных пироксенов. Согласно номенклатуре [20], результаты микронзондовых исследований позволяют отнести данный минерал к Na-Ca-группе пироксенов,

а по химическому составу — к омфациту с общей формулой $(\text{Ca}_{0.66}\text{Na}_{0.26})_{0.92}(\text{Mg}_{0.66}\text{Al}_{0.29}\text{Fe}^{2+}_{0.06})_{1.01}(\text{Si}_{1.96}\text{Al}_{0.04})_{2.00}\text{O}_6$ с содержанием $\text{Aug}_{63.9}\text{Id}_{33.8}\text{Aeg}_{2.3}$. Таким образом, в соответствии с минералого-петрографическим исследованием и современной классификацией корректнее данную породу отнести к **кварц-омфацил-амфибол-кианитсодержащей эклогитоподобной породе**. Амфиболитовый апоэклогитовый бластомилонит, ранее определенный как амфиболитовый бластит по аподиабазовому эклогиту (672/4), представляет собой темно-зеленую породу с черными обособлениями овальной формы, размер которых достигает 0.7–1.5 см (рис. 4). Структура породы бластомилонитовая. Порода характеризуется мелкозернистым гранобластовым матриксом и отдельными крупными порфиробластами, сложенными амфиболом. Состав породы: амфибол (60 %), кварц (20 %), мусковит (15 %), моноклинный пироксен (10 %). Второстепенную роль играют плагиоклаз (альбит), цоизит и биотит. Акцессорные минералы представлены гранатом, цирконом, рутилом, рудным минералом.

По трещинам амфибола в порфироблестах и на границах с основной тканью обнаружены амёбовидные выделения кварца, единичные ксеноморфные зерна альбита $(\text{Na}_{0.91}\text{Ca}_{0.02}\text{K}_{0.01})_{2.90}\text{Al}_{1.01}(\text{Si}_{2.96}\text{Al}_{0.04})_{3.00}\text{O}_{8.00}$,

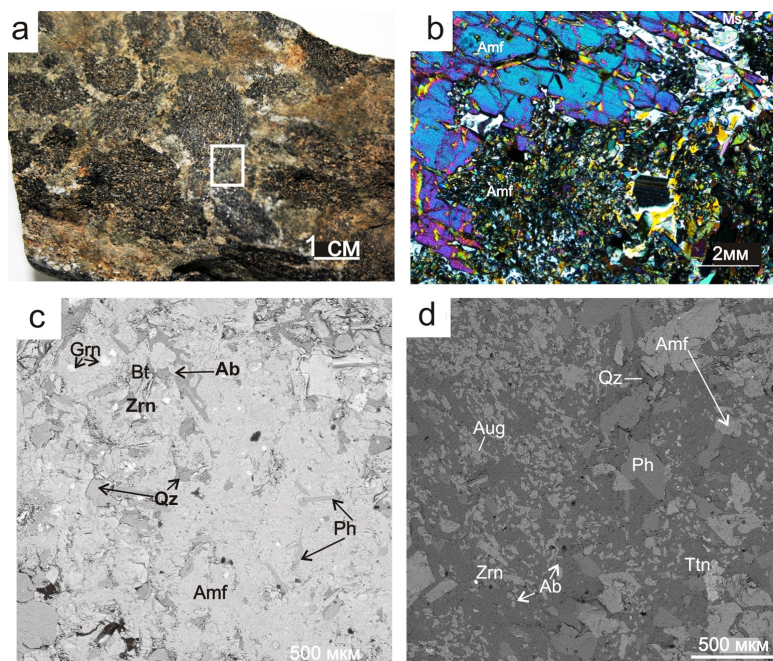


Рис. 4. Минеральные ассоциации апоэклогитового амфиболита (обр. 672/4): а, б — николи X; с, д — СЭМ-снимок. Обозначения минералов [21]: Qz — кварц, Amp — амфибол, Grt — гранат, Bt — биотит, Ms — мусковит, Zrn — циркон, Ttn — титанит, Ab — альбит, Aug — авгит

Fig. 4. Mineral associations of amphibole apoclogite blastomylonite (sample 672/4): а, б — Nicoli X; с, д — SEM-image. Mineral designation [21]: Qz — quartz, Amp — amphibole, Grt — garnet, Bt — biotite, Ms — muscovite, Zrn — zircon, Ttn — titanite, Ab — albite, Aug — augite

единичные зерна циркона размером менее 2 мкм. Помимо вышеуказанных минералов встречаются округлые, реже изометричные, с кристаллографическими очертаниями кристаллы граната. По химическому составу минерал отвечает $\text{Alm}_{41}\text{Prp}_{34}\text{Grs}_{25}\text{Sps}_1$ с общей формулой $(\text{Fe}^{2+}_{1.18}\text{Mg}_{0.98}\text{Ca}_{0.72}\text{Mn}_{0.02})_{2.90}\text{Al}_{2.01}\text{Si}_{3.02}\text{O}_{12.00}$. В виде включений в амфиболе установлены чешуйки биотита с промежуточным антит-флогопитовым составом $\text{K}_{0.87}(\text{Mg}_{1.47}\text{Fe}^{3+}_{0.86}\text{Al}_{0.35}\text{Fe}^{2+}_{0.10}\text{Ti}_{0.02})_{2.80}(\text{Si}_{2.88}\text{Al}_{1.12})_{4.00}\text{O}_{10.00}(\text{OH})_{2.00}$, размером до 200 мкм [19].

Матрикс имеет кварц-пироксен-амфиболовый состав, образуя гомеобластовую структуру. В нем амфибол более мелкозернистый, с размером кристаллов до 200 мкм. Более широко в матриксе распространены ксеноморфные кристаллы размером до 170 мкм слюды мусковит-алюминоседадонитового ряда (фенгит) с общей формулой $(\text{K}_{0.78}\text{Na}_{0.06})_{0.84}(\text{Al}_{1.72}\text{Mg}_{0.32}\text{Fe}^{2+}_{0.13}\text{Ti}_{0.04})_{2.21}(\text{Si}_{2.97}\text{Al}_{1.03})_{4.00}\text{O}_{10.00}(\text{OH})_{2.00}$. Обнаружены ксеноморфные выделения кварца и альбита, единичные зерна циркона размером менее 2 мкм, выделения титанита размером до 200 мкм. Отличительной особенностью минерального состава матрикса является наличие короткопризматических кристаллов клинопироксена. По результатам микрозондового анализа данный минерал относится к Ca-группе и соответствует авгиту с общей формулой $(\text{Ca}_{0.84}\text{Na}_{0.13})_{0.97}(\text{Mg}_{0.64}\text{Al}_{0.14}\text{Fe}^{2+}_{0.22})_{1.00}(\text{Si}_{1.99}\text{Al}_{0.01})_{2.00}\text{O}_{6.00}$, с содержанием $\text{Wo}_{72.0}\text{En}_{15.8}\text{Fs}_{12.2}$ (рис. 4, д) [20].

Амфиболы

Структурно-химические особенности амфиболов были изучены с помощью рамановской спектроскопии, рентгеновского и микрозондового анализов. Предыдущие исследования показывают, что рентгеновский анализ может быть успешно применен для диагностики амфиболов, с его помощью удастся выделять не только изоморфные серии амфиболов, но и отдельные члены этих серий [3]. Однако в изоморфной серии роговых обманок на а- и b-параметрах не отражаются гетеровалентные замещения катионов в восьмерной и шестерной координациях. Проведенные

исследования позволили установить, что во всех видах пород амфиболы представлены моноклинными разностями со структурным типом, близким к магнезиальным роговым обманкам с параметрами (Å): $a = 9.8158 \pm 0.0006$; $b = 17.9879 \pm 0.0013$; $c = 5.2857 \pm 0.0004$; $\beta = 104.894 \pm 0.007$; $\text{cell vol} = 901.92 \pm 0.08$.

Для амфиболов из различных пород установлен общий характер КР-спектров (рис. 5). Для проведения сравнительного анализа из базы данных RRUFF (<http://rruff.info>) были взяты КР-спектры актинолита и паргасита. Появление полос в спектральной области 200–300 cm^{-1} связывают с вибрацией решетки [13]. В исследуемых образцах в области спектра 300–450 cm^{-1} появляются три полосы, которые обусловлены катионами Ca, Mg и Fe^{2+} . В области 500–600 cm^{-1} установлены две полосы. Во всех исследованных образцах максимум фиксируется в области 667–672 cm^{-1} . В отличие от амфиболов из других пород в амфиболитовом апоэклогитовом blastomylonite в области 744–761 cm^{-1} полосы отсутствуют. Интерпретация спектров в области 850–1200 cm^{-1} обычно основана на связях O–Si–O [13]. Таким образом, в КР-спектрах исследуемых амфиболов наблюдаются схожие черты спектров как актинолита, так и паргасита.

Микрозондовые исследования уточнили состав амфиболов. В них не установлена зональность или изменение химического состава по профилю «край — центр — край». По Н. Г. Удовкиной (1985), каринтин отнесен к магнезиальным роговым обманкам со следующими параметрами (ф. ед.): $\text{Al}^{\text{IV}} = 0.88\text{--}1.5$; $\text{Fe}^{2+} = 0.32\text{--}0.91$; $\text{Mg} = 3.47\text{--}3.91$; $\text{Ca} = 1.34\text{--}1.63$. Вариация химического состава амфиболов и разные способы пересчета химических анализов не позволяют провести прямое сопоставление результатов. В связи с этим полученные нами и предыдущие результаты микрозондового исследования были пересчитаны согласно методике расчета кристаллохимических формул амфиболов на 13 зарядов с расчетом количества трехвалентного железа по методу баланса заряда [15, 17] (см. таблицу).

При классификации амфиболов доминирующим критерием является соотношение кальция и натрия в позиции В [15]. В группу кальциевых амфиболов вош-

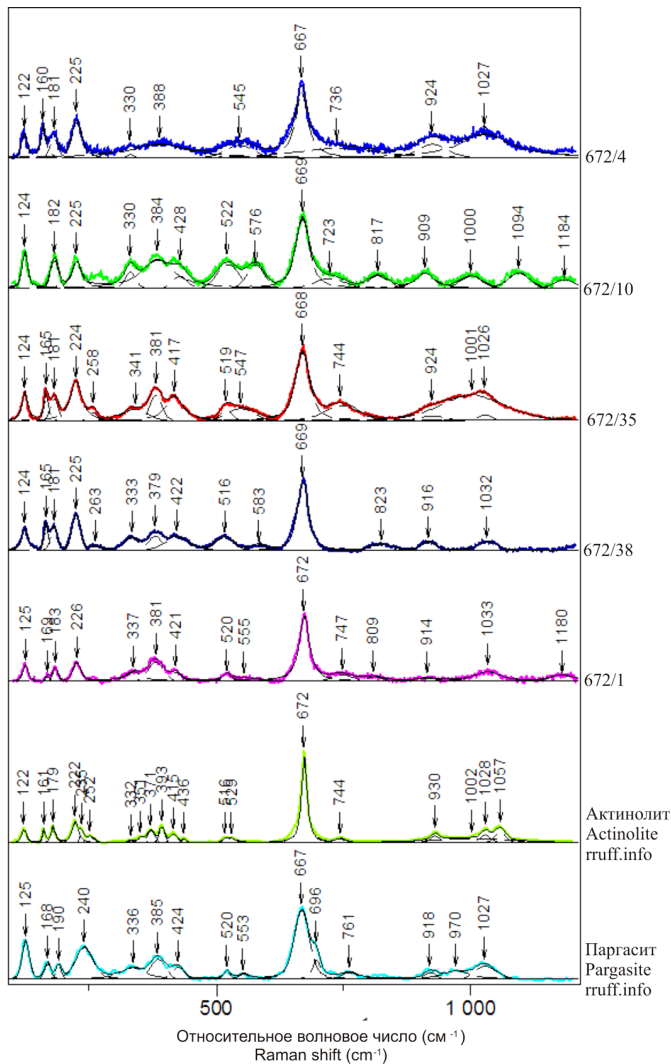


Рис. 5. Рамановские спектры амфиболов

Fig. 5. Raman spectra of amphiboles

ли минералы, где данный показатель варьирует в пределах 0.75–0.92 ф.ед. (рис. 6, а). В данной группе амфиболов установлены магнезиогорнблендит и чермакит. В основной ткани амфиболитового апоэклогитового бластомилонита обнаружен чермакит. Химизм данного амфибола отличается низким содержанием кремнезема (до 6.4 ф. ед.) и более высоким содержанием кальция и железа. В магнезиогорнблендите содержание кремнезема варьирует в пределах 6.7–7.0 ф. ед., в свою очередь, содержание Al в четверной координации колеблется от 1.0 до 1.3 ф. ед. Магнезиальность данных амфиболов варьирует. Наиболее обогащенные магнием разновидности встречаются в кварц-омфациит-амфибол-кианитсодержащих эклогитоподобных породах (672/1, 672/38), где содержание Mg+2 в позиции С достигает 3.66 ф. ед. К магнезиогорнблендиту отнесены каринтины из эклогитов (66/10), химический состав которых был получен Н. Г. Удовкиной (1985). Суммарное количество железа в магнезиогорнблендите из разных пород колеблется от 0.52 до 1.63 ф. ед., наибольшее содержание данного элемента обнаружено в амфиболе из порфиробласт амфиболитового апоэклогитового бластомилонита (672/4). Это позволяет отнести минерал к железистой разновидности магнезиогорнблендита. Только в магнезиогорнблендите из кварц-омфациит-амфибол-кианитсодержащей эклогитоподобной поро-

ды (672/1) были обнаружены незначительные примеси хрома (0.06 мас. %) и хлора (0.16 мас. %).

Остальные исследуемые амфиболы по составу отвечают натрий-кальциевым разновидностям, в которых параметр BCa/B(Ca+Na) варьирует от 0.65 до 0.73 (рис. 6, б). В соответствии с содержанием кремния в пределах 6.62–6.71 ф.ед. и количеством Na и K в позиции А от 0.1 до 0.33 ф.ед. химический состав минералов соответствует барруазиту. Данный минерал встречается в порфиробластах амфиболитового апоэклогитового бластомилонита (672/4) и в амфибол-кварц-гранатовая эклогитоподобной породе (672/10, 35).

К более магнезиальной разновидности барруазита можно отнести амфиболы с содержанием магния до 0.94 ф. ед. из амфибол-кварц-гранатовых эклогитоподобных пород. К магнезиальному барруазиту относится каринтин из эклогитов, химический состав которого был получен Н. Г. Удовкиной (1985). Более железистый барруазит встречается в эклогитовом бластомилоните с суммарным содержанием железа 1.80 ф. ед.

В группе натриево-кальциевых амфиболов выделен магнезиотарамит, который характеризуется низким содержанием кремния 6.46–6.48 ф. ед., высокой магнезиальностью 0.80–0.83 ф. ед. и количеством Na + K в позиции А от 0.52 до 0.55. Данная разновидность амфибола обнаружена в прожилках амфибол-кварц-гранатовая эклогитоподобной породы (672/35) и в оторочках кварц-омфациит-амфибол-кианитсодержащей эклогитоподобной породы (672/38). Аналогичный по составу амфибол отметила Н. Г. Удовкина в кварц-мусковитовой жиле в эклогитах.

Заключение

В пределах района Слюдяной горки в эклогитоподобных породах отмечаются породы с различным соотношением породообразующих минералов. В результате номенклатурного анализа для ранее диагностированных каринтинсодержащих пород данного района Слюдяной горки Полярного Урала установлен определенный набор амфиболов:

- в матриксе амфиболитового апоэклогитового бластомилонита обнаружен железосодержащий чермакит. По химизму сопоставим с амфиболами гранулитовых комплексов, но отличается более высоким содержанием натрия и меньшим — кальция и калия. В порфиробластах породы установлены обогащенные железом магнезиогорнблендит и барруазит.

- в матриксе кварц-омфациит-амфибол-кианитсодержащей эклогитоподобной породы установлен магнезиогорнблендит, для которого характерно низкое содержание кремнезема и кальция, высокое — октаэдрического алюминия и натрия. В амфиболитовых прожилках установлен магнезиотарамит с высоким содержанием кремнезема, алюминия и магния и с низкой железистостью.

- в матриксе амфибол-кварц-гранатовая эклогитоподобной породы обнаружена магнезиальная разновидность барруазита. В прожилках установлен магнезиотарамит, для которого характерно высокое содержание кремнезема, алюминия и низкая железистость.

Таким образом, в высокобарических метакомплексах марункеуского комплекса наблюдаются кальциевые железосодержащие минеральные виды амфиболов



Химический состав (мас. %) амфиболов из пород Слюдяной горки

Chemical composition (wt. %) of amphiboles from the Mica Hill rocks

Оксиды Oxides	672/4 (n = 3)	672/1 (n = 4)	672/4 (n = 4)	672/38 (n = 6)	672/35 (n = 3)	66/10	672/10 (n = 4)	672/4 (n = 4)	672/35 (n = 4)	183	672/35 (n = 4)	672/38 (n = 2)	288
	1	2	3	4	5	6	7	8	9	10	11	12	13
SiO ₂	43.32	48.96	45.45	47.34	45.27	48.6	47.91	46.53	46.20	48.13	45.1	45.2	45.72
TiO ₂	0.53	0.42	0.58	0.37	0.55	0.3	0.50	0.77	0.50	0.54	0.67	0.79	0.45
Al ₂ O ₃	14.11	12.61	12.48	10.73	13.07	11.92	14.21	13.61	14.79	13.17	15.09	15.08	15.18
Cr ₂ O ₃	0.00	0.06	0.00	0.00	0.00	0.17	0.00	0.00	0.00	0.18	0.00	0.00	0.05
FeO	14.06	4.69	13.49	4.66	7.74	4.17	7.68	14.30	7.56	4.63	7.85	7.96	5.21
Fe ₂ O ₃	-	-	-	-	-	0.55	-	-	-	2.34	-	-	1.68
MnO	0.00	0.00	0.12	0.00	0.00	0.07	0.00	0.31	0.00	0.06	0.00	0.00	0.04
MgO	10.10	17.11	10.89	16.77	13.6	17.61	14.86	9.90	13.44	16.33	13.46	13.71	15.03
CaO	11.49	10.53	10.60	10.04	9.52	10.8	9.44	8.41	9.11	9.73	9.43	9.38	9.39
Na ₂ O	1.66	2.49	1.96	2.14	2.75	2.55	3.03	3.03	2.77	2.74	3.36	3.35	3.41
K ₂ O	1.38	0.62	0.84	0.43	0.4	0.6	0.60	0.78	0.51	0.73	0.82	0.78	0.88
Сумма Total	96.65	97.47	96.39	70.09	92.89	97.34	98.24	97.62	94.90	98.58	96.18	96.38	97.04
Коэффициенты в формуле / Coefficients in formula													
Si	6.40	6.80	6.70	6.90	6.70	6.78	6.65	6.71	6.65	6.64	6.49	6.48	6.46
Ti	0.06	0.04	0.06	0.04	0.06	0.03	0.05	0.08	0.05	0.06	0.07	0.09	0.05
Al ^{IV}	1.60	1.20	1.30	1.10	1.30	1.22	1.35	1.29	1.35	1.36	1.47	1.52	1.54
Al ^{VI}	0.88	0.86	0.87	0.75	0.98	0.74	0.98	1.03	1.16	0.78	1.09	1.03	0.98
Cr	0.00	0.01	0.00	0.00	0.00	0.02	0.00	0.00	0.00	0.02	0.00	0.00	0.01
Fe ⁺²	1.69	0.22	1.42	0.15	0.65	0.49	0.36	1.22	0.49	0.53	0.71	0.59	0.62
Mn	0.00	0.00	0.01	0.00	0.00	0.01	0.00	0.04	0.00	0.01	0.00	0.00	0.00
Mg	2.25	3.54	2.39	3.64	3.00	3.66	3.08	2.13	2.88	3.36	2.89	2.93	3.16
Ca	1.84	1.57	1.67	1.57	1.51	1.61	1.41	1.30	1.40	1.44	1.46	1.44	1.42
Na ₂	0.16	0.43	0.33	0.43	0.49	0.39	0.59	0.70	0.55	0.56	0.54	0.56	0.57
Na ₁	0.32	0.24	0.23	0.17	0.30	0.30	0.22	0.15	0.22	0.17	0.39	0.37	0.36
K	0.26	0.11	0.16	0.08	0.08	0.11	0.11	0.14	0.09	0.13	0.15	0.14	0.16
Fe ⁺³	0.60	0.33	0.25	0.45	0.31	0.06	0.53	0.58	0.41	0.24	0.23	0.36	0.18
T	8.00	8.00	8.00	8.00	8.00	8.00	8.00	8.00	8.00	8.00	8.00	8.00	8.00
C ₁	1.00	1.24	1.18	1.24	1.35	0.85	1.56	1.69	1.62	1.10	1.39	1.48	1.22
C ₂	3.94	3.76	3.81	3.79	3.65	4.15	3.44	3.35	3.37	3.89	3.60	3.52	3.78
C	4.94	5.00	4.99	5.03	5.00	4.99	5.00	5.04	5.00	4.99	5.00	5.00	5.00
B	2.00	2.00	2.01	2.00	2.00	2.01	2.00	2.04	1.96	2.01	2.00	2.00	2.00
A	0.58	0.35	0.39	0.25	0.37	0.41	0.33	0.29	0.31	0.30	0.55	0.52	0.52
^B Ca/ ^B (Ca+Na)	0.92	0.78	0.84	0.78	0.75	0.81	0.70	0.65	0.72	0.72	0.73	0.72	0.71
Mg/(Mg+Fe ⁺²)	0.57	0.94	0.63	0.96	0.82	0.88	0.89	0.64	0.86	0.86	0.80	0.83	0.84
Кальциевые амфиболы Calcium amphiboles							Натриево-кальциевые амфиболы Sodium-calcium amphiboles						
Черма- кит Tscher- makite		Магнезиогорнблендит Magnesiohornblendite					Барроузит Barroisite			Магнезиотарамит Magnesiotaramite			

Примечание: 1, 3, 8 — амфиболитовый апоэклогитовый бластомилонит; 2, 4, 12 — кварц-омфацил-амфибол-кианитсодержащая эклогитоподобная порода; 5, 7, 9, 11 — амфибол-кварц-гранатовая эклогитоподобная порода; 6 — зеленовато-бурый каринтин из эклогита (по Удовкиной, 1985; ан. 1); 10 — коричневат-зеленый каринтин из каринтинового эклогита (по Удовкиной, 1985; ан. 3); 13 — каринтин из кварц-мусковитовых жил в эклогитах (по Удовкиной, 1985; ан. 7).

Note: 1, 3, 8 — amphibolite apoeclomite blastomylonite; 2, 4, 12 — quartz-omphacite-amphibole-kyanite-containing eclogitoid; 5, 7, 9, 11 — amphibole-quartz-garnet eclogitoid; 6 — greenish-brown carinthine from eclogite (according to Udovkina, 1985; an. 1); 10 — brownish-green carinthine from carinthine eclogite (according to Udovkina, 1985; an. 3); 13 — carinthine from quartz-muscovite veins in eclogites (according to Udovkina, 1985; an. 7).



Рис. 6. Классификационные схемы кальциевых (а) и натрий-кальциевых (b, c) амфиболов [17]. Условные обозначения: 672/4 — амфиболитовый апоэклогитовый бластомилонит; 672/1, 672/38 — кварц-омфациит-амфибол-кианитсодержащая эклогитоподобная порода; 672/10, 672/35 — амфибол-кварц-гранатовая эклогитоподобная порода; 66/10 — зеленовато-бурый каринтин из эклогита (по Удовкиной, 1985; ан. 1); 183 — коричневатозеленый каринтин из каринтинового эклогита (по Удовкиной, 1985; ан. 3); 66/11 — каринтин из кварц-мусковитовых жил в эклогитах (по Удовкиной, 1985; ан. 4); 289, 288 — роговая обманка из реакционной оторочки вокруг биметасоматического эклогита в ультраосновных породах (по Удовкиной, 1985; ан. 6)

Fig. 6. Classification schemes of calcium (a) and sodium-calcium (b, c) amphiboles [17]. Legend: 672/4 — amphibolite apoeclotite blastomylonite; 672/1, 672/38 — quartz-omphacite-amphibole-kyanite-containing eclogitoid; 672/10, 672/35 — amphibole-quartz-garnet eclogitoid; 66/10 — greenish-brown carinthine from eclogite (according to Udovkina, 1985; an. 1); 183 — brownish-green carinthine from carinthine eclogite (according to Udovkina, 1985; an. 3); 66/11 — carinthine from quartz-muscovite veins in eclogites (according to Udovkina, 1985; an. 4); 289, 288 — hornblende from the reaction rim around the bimetasomatic eclogite in ultrabasic rocks (according to Udovkina, 1985; an. 6)

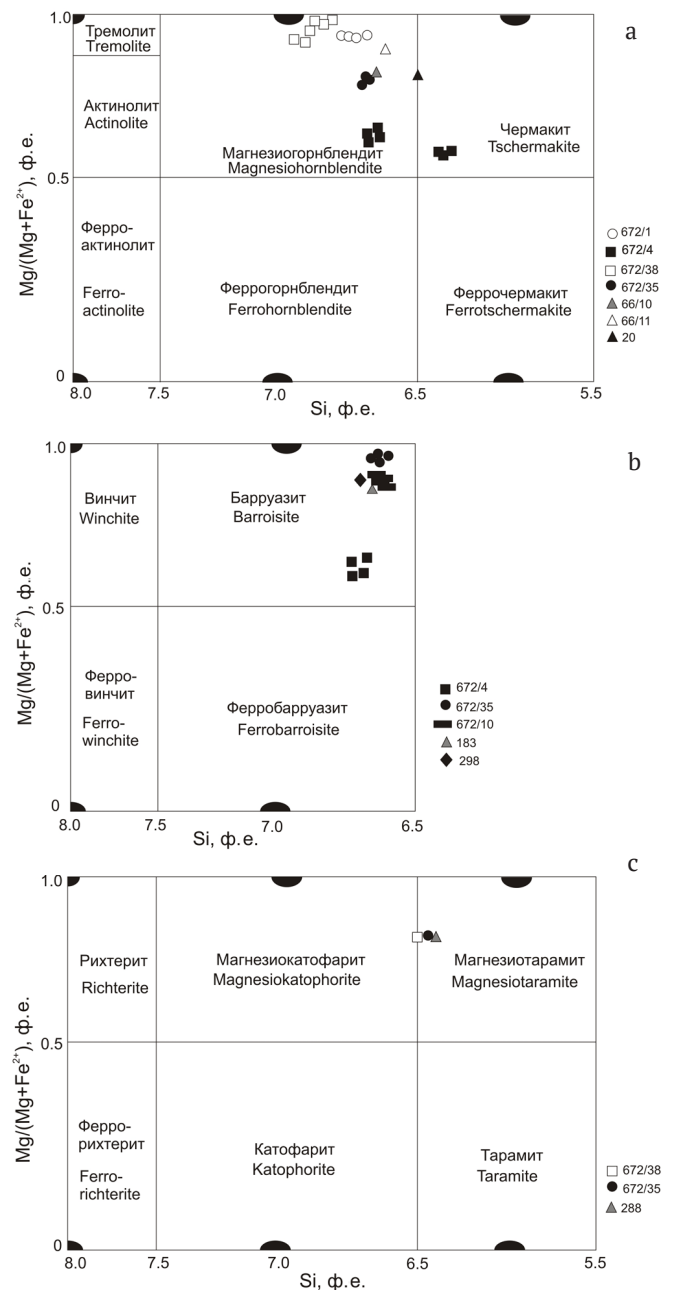
(чермакит-магнезиогорнблендит) и магнезиальные натрий-кальциевые (барруазит-тарамит).

С учетом современных данных и изложенных выше результатов для установления связи изменения состава амфиболов со стадиями метаморфизма можно рекомендовать дальнейшие исследования этого вопроса с привлечением более представительного геологического материала. При проведении минералогического петрографического исследования и в классификации пород эклогитовой фации не рекомендуется использовать в наименовании амфиболов название «каринтин».

Авторы выражают благодарность д. г.-м. н. А. М. Пыстину, к. г.-м. н. А. Б. Макееву, к. г.-м. н. С. И. Исаенко, Е. М. Тропникову за помощь и консультации, а также рецензентам за критические замечания.

Литература

1. Вализер П. М., Дубинина Е. В. Апоамфиболитовые эклогиты Марункеуского эклогит-гнейсового комплекса (Полярный Урал) // ЗРМО. 2006. № 2. С. 98—105.
2. Вализер П. М., Кобяшев Ю. С., Никандров С. Н. Амфиболы Урала. Миасс: ИГЗ УрО РАН, 2004. 139 с.
3. Гинзбург И. В., Сидоренко Г. А., Рогачев Д. Л. О зависимости между главными изоморфными замещениями и некоторыми параметрами кристаллической структуры амфиболов // Труды Минералогического музея имени А. Е. Ферсмана. 1961. Вып. 12. С. 3—36.
4. Куликова К. В., Варламов Д. А. Эклогит-гнейсовый комплекс хребта Марун-Кеу (Полярный Урал) // Геодинамическая эволюция литосферы Центрально-Азиатского подвижного пояса (от океана к континенту). Иркутск: Институт земной коры СО РАН. 2014. С. 177—180.
5. Литовско Д. Н. Минералогическая изученность Полярного Урала. Сыктывкар: Геопринт, 1996. 39 с.
6. Лю И., Перчук А. Л., Арискин А. А. Высокобарный ме-



таморфизм в перидотитовом кумулате комплекса Марун-Кеу, Полярный Урал // Петрология. 2019. Т. 27. № 2. С. 138—160.

7. Номенклатура амфиболов: доклад подкомитета по амфиболом комиссии по новым минералам и названиям минералов Международной минералогической ассоциации (КНМНМ ММА) // ЗВМО. 1997. № 6. С. 82—102.
8. Пыстин А. М. Полиметаморфические комплексы западного склона Урала. СПб.: Наука, 1994. 208 с.
9. Пыстин А. М., Пыстина Ю. и., Потанов И. Л. и др. Раннедокембрийская история метаморфизма пород гранулитовых и эклогитовых комплексов палеоконтинентальной зоны Урала. Сыктывкар: Геопринт, 2012. 46 с.
10. Селяцкий А. Ю., Куликова К. В. Эволюция химического состава граната при метаморфизме УНР-комплекса Марун-Кеу (Полярный Урал) // Вестник Института геологии Коми НЦ УрО РАН. 2017. № 8. С. 26—43.
11. Удовкина Н. Г. Эклогиты СССР. М.: Наука, 1985. 257 с.
12. Уляшева Н. С., Пыстин А. М., Панфилов А. В., Потанов И. Л. Две серии первично-магматических пород в марункеуском эклогит-гнейсовом комплексе (Полярный Урал) //



Вестник Института геологии Коми НЦ УрО РАН. Сыктывкар, 2015. № 11. С. 3–12.

13. Apopei A. I., Buzgar N. The raman study of amphiboles // *Analele științifice ale universității «Al. I. Cuza» Iași. Geologie*. T. LVI. № 1. 2010. P. 57–83.

14. Hawthorne F. C., Oberti R. Amphiboles: Crystal Chemistry // *Reviews in Mineralogy & Geochemistry*. 2007. Vol. 67. P. 1–88.

15. Hawthorne F. C., Oberti R., Harlow G. E., Maresch W. V., Martin R. F., Schumacher J. C., Welch M. D. IMA report: Nomenclature of the amphibole supergroup. *American Mineralogist*. 2012. Vol. 97. P. 2031–2048.

16. Leake B. E., Woolley A. R., Arps C. E. S. et al. Nomenclature of amphiboles: report of the Subcommittee on Amphiboles of the International Mineralogical Association, Commission on New Minerals and Mineral Names, *The Canadian Mineralogist*, 1997. Vol. 35. P. 219–246.

17. Leake B. E. Nomenclature of amphiboles: additions and revisions to the International Mineralogical Association's 1997 recommendations // *The Canadian Mineralogist*. 2003. Vol. 41. P. 1355–1362.

18. *Metamorphic Rocks: A Classification and Glossary of Terms*, Recommendation of the International Union of Geological Sciences // Eds. D. Fettes, J. Desmons. Cambridge: University Press, UK. 2007. 244 p.

19. Milan R., Cavazzini G., D'yakonov Y. S. et al. Nomenclature of the micas // *The Canadian Mineralogist*. 1998. Vol. 36(3). P. 905–912.

20. Morimoto N. et al. Nomenclature of pyroxenes // *The Canadian Mineralogist*. 1989. Vol. 27. P. 143–156.

21. Whitney D. L., Bernard W. Abbreviations for names of rock-forming minerals // *American Mineralogist*. Vol. 95. P. 185–187.

References

1. Valizer P. M., Dubinina E. V. Apoamfibolitovye eklogity Marunkeuskogo eklogit-gnejsovogo kompleksa (Polyarnyj Ural) (Apoamfibolite eclogites of the Marun-Keu eclogite-gneiss complex (Polar Urals)). *Proceedings of RMS*, 2006, No. 2, pp. 98–105.

2. Valizer P. M., Kobyshev Yu. S., Nikandrov S. N. Amfiboly Urala (Amfiboles of the Urals). Miass: IGZ UB RAS, 2004, 139 p.

3. Ginzburg I. V., Sidorenko G. A., Rogachev D. L. O zavisimosti mezhdu glavnymi izomorfnyimi zameshcheniyami i nekotorymi parametrami kristallicheskoj struktury amfibolov (Relationship between main isomorphic substitutions and some parameters of the crystal structure of amphiboles). *Proceedings of Mineralogical museum named after A. E. Fersman*, 1961, V. 12, pp. 3–36.

4. Kulikova K. V., Varlamov D. A. Eklogit-gnejsovyj kompleks hrebta Marun-Keu (Polyarnyj Ural) (Eclogite-gneiss complex of the Marun-Keu ridge (Polar Urals)). *Geodinamicheskaya evolyuciya litosfery Centralno-Aziatskogo podvizhnogo poyasa (ot okeana k kontinentu) (Geodynamic evolution of lithosphere of Central Asia mobile belt)*. Irkutsk: Institute of Earth crust SB RAS, 2014, pp. 177–180.

5. Litoschko D. N. Mineralogicheskaya izuchennost Polyarnogo Urala (Mineralogical studies of the Polar Urals). Syktывkar: Geoprint, 1996, 39 p.

6. Lyu I., Perchuk A. L., Ariskin A. A. Vysokobarnyj metamorfizm v peridotitovom kumulate kompleksa Marun-Keu, Polyarnyj Ural (High-impact metamorphism in the

peridotite cumulate of the Marun-Keu complex, Polar Urals). *Petrologiya*, 2019, V. 27, No. 2, pp. 138–160.

7. Nomenklatura amfibolov: doklad podkomiteta po amfibolam komissii po novym mineralam i nazvaniyam mineralov mezhdunarodnoj mineralogicheskoy asociacii (KNMNM MMA) (Amphibole Nomenclature: Report of the Amphibole Subcommittee of the Commission on New Minerals and Mineral Names of the International Mineralogical Association (KNMNM MMA)). *Proceedings of RMS*, 1997, No. 6, pp. 82–102.

8. Pystin A. M. Polimetamorficheskie komplekсы zapadnogo sklona Urala (Polymetamorphic complexes of the western slope of the Urals). St. Petersburg: Nauka, 1994, 208 p.

9. Pystin A. M., Pystina Yu. I., Potapov I. L. et al. Rannedokembrijskaya istoriya metamorfizma porod granulitovyh i eklogitovyh kompleksov paleokontinental'noj zony Urala (Early Precambrian history of metamorphism of rocks of granulite and eclogite complexes of the paleocontinental zone of the Urals). Syktывkar: Geoprint, 2012, 46 p.

10. Selyatickij A. Yu., Kulikova K. V. Evolyuciya himicheskogo sostava granata pri metamorfizme UHP-kompleksa Marun-Keu (Polyarnyj Ural) (Evolution of the chemical composition of garnet in the metamorphism of the Marun-Key UHP complex (Polar Urals)). *Vestnik of Institute of geology Komi SC UB RAS, Syktывkar*, 2017, No. 8, pp. 26–43.

11. Udovkina N. G. Eklogity SSSR (Eclogites of the USSR). Moscow: Nauka, 1985, 257 p.

12. Ulyasheva N. S., Pystin A. M., Panfilov A. V., Potapov I. L. Dve serii pervichno-magmatischeskih porod v Marun-Keuskom eklogit-gnejsovom komplekse (Polyarnyj Ural) (Two series of primary igneous rocks in the Marun-Keu eclogite-gneiss complex (Polar Urals)). *Vestnik of Institute of geology Komi SC UB RAS, Syktывkar*, 2015, No. 11, pp.

13. Apopei A. I., Buzgar N. The raman study of amphiboles. *Analele științifice ale universității «Al. I. Cuza» Iași. Geologie*, V. LVI, No. 1, 2010, pp. 57–83.

14. Hawthorne F. C., Oberti R. Amphiboles: Crystal Chemistry. *Reviews in Mineralogy & Geochemistry*, 2007, V. 67, pp. 1–88.

15. Hawthorne F. C., Oberti R., Harlow G. E., Maresch W. V., Martin R. F., Schumacher J. C., Welch M. D. IMA report: Nomenclature of the amphibole supergroup. *American Mineralogist*, 2012, V. 97, pp. 2031–2048.

16. Leake B. E., Woolley A. R., Arps C. E. S. et al. Nomenclature of amphiboles: report of the Subcommittee on Amphiboles of the International Mineralogical Association, Commission on New Minerals and Mineral Names, *The Canadian Mineralogist*, 1997, V. 35, pp. 219–246.

17. Leake B. E. Nomenclature of amphiboles: additions and revisions to the International Mineralogical Association's 1997 recommendations. *The Canadian Mineralogist*, 2003, V. 41, pp. 1355–1362.

18. *Metamorphic Rocks: A Classification and Glossary of Terms*, Recommendation of the International Union of Geological Sciences. Eds. D. Fettes, J. Desmons. Cambridge: University Press, UK, 2007, 244 p.

19. Milan R., Cavazzini G., D'yakonov Y. S. et al. Nomenclature of the micas. *The Canadian Mineralogist*, 1998, V. 36(3), pp. 905–912.

20. Morimoto N. et al. Nomenclature of pyroxenes. *The Canadian Mineralogist*, 1989, V. 27, pp. 143–156.

21. Whitney D. L., Bernard W. Abbreviations for names of rock-forming minerals. *American Mineralogist*. V. 95, pp. 185–187.



Экскурсия «Малое геологическое кольцо Республики Коми» «Small geological ring of the Komi Republic» field trip

The «Small geological ring of the Komi Republic» field trip, organized by the Institute of geology, FRC Komi SC UB RAS (Syktyvkar), took place from 23 to 27 August 2021. Specialists-sedimentologists from St. Petersburg, Tyumen and Yekaterinburg – representatives of the oil and gas industry and academic science – attended it. The excursionists observed Riphean and Upper Paleozoic deposits of the southern part of the Timan Ridge exposed within the Dzhezdzhiparma and Ukhta-Izhma swells.

Полевая экскурсия «Малое геологическое кольцо Республики Коми», организованная Институтом геологии ФИЦ Коми НЦ УрО РАН (г. Сыктывкар), состоялась в период с 23 по 27 августа 2021 года. В ней приняли участие специалисты из Санкт-Петербурга, Тюмени и Екатеринбурга, занимающиеся изучением осадочных толщ, – представители нефтегазовой промышленности и академической науки. Экскурсанты ознакомились с рифейскими и верхнепалеозойскими отложениями южной части Тиманского кряжа, обнажающимися в пределах Джеджимпарминского и Ухта-Ижемского валов.

Обязательным к посещению был карьер Вапол, в котором вскрыты органогенные постройки верхнего рифея. При внимательном рассмотрении можно различить пространственные взаимоотношения между строматолитовыми столбиками и окружающими их отложениями. Ещё одним классическим объектом, на котором проходило практику не одно поколение сыктывкарских студентов-геологов, явился разрез в карьере Асыввож. Здесь вскрыта достаточно мощная толща рифейских малиново-красных песчаников с самыми разнообразными текстурными особенностями – просто кладёшь информацию для седиментолога! На породах рифея в этом же карьере несогласно залегают терригенные алмазоносные отложения девона, которые, в свою очередь, перекрываются четвертичными флювиогляциальными осадками. В общем, природой здесь подобрано геологическое ассорти на любой вкус и цвет.



Строение строматолитов ваполской свиты верхнего рифея (карьер Вапол, возв. Джеджимпарма). Фото С. А. Дуба

Structure of stromatolites of the Upper Riphean Vapolskaya suite (Vapol quarry, Dzhezdzhiparma uplift). Photo by S. A. Dub

Чрезвычайно богатыми на находки фауны беспозвоночных (строматопороидеи, моллюски, иглокожие, кораллы, брахиоподы) оказались средневерхнедевонские карбонатные отложения в окрестностях карьера Шераэль. Большой известностью в узких кругах пользуется риф Седью – модельный объект для изучения верхнедевонских рифогенных образований в связи с их нефтегазоносностью в пределах Тимано-Печорской провинции. Он обнажается по берегам одноимённой реки в серии скальных выходов, в которых можно отыскать остатки рифообразующей биоты. К северу риф замещается фациями лагунных известняков с прослоями зеленовато-голубых глин и далее литоральных зернистых разностей. Приятно порадовали также крупные ихнофоссилии в каменноу-



А. Н. Сандула демонстрирует особенности текстур волн течения песчаников джеджимской свиты верхнего рифея (карьер Асыввож, возв. Джеджимпарма). Фото С. А. Дуба

A. N. Sandula demonstrates features of the wave textures of sandstones of the Upper Riphean Dzhezdzhim suite (Assyvovzh quarry, Dzhezdzhiparma uplift). Photo by S. A. Dub



Штольня в кавернозных доломитах ижемской свиты (асфальтитовый карьер около п. Кэмдин, МО ГО «Ухта»). Фото С. А. Дуба

Adit in cavernous dolomites of the Izhma suite (asphaltite quarry near the village of Kemdin, Ukhta). Photo by S. A. Dub



Е. С. Пономаренко (в центре) объясняет детали строения рифа Седью (МО ГО «Ухта»). Фото А. Н. Сандулы

E. S. Ponomarenko (center) explains details of the structure of the Sedyu reef (Ukhta). Photo by A. N. Sandula

гольных мергелях и пермские оолитовые доломиты на самом востоке кольца.

Геология Ухтинского и Сосногорского районов представляет особый интерес для литологов-нефтяников. Одним из основных объектов экскурсии являлись битуминозные кремнисто-карбонатные отложения стратотипа доманикового горизонта верхнего девона, которые традиционно считаются нефтематеринскими, а в настоящее время рассматриваются и как нетрадиционные коллекторы углеводородов. Данные разрезы предоставляют уникальную возможность проследить пространственные изменения вещественно-структурных признаков пород и попытаться сопоставить их с ядерным материалом. В целом выяснение генезиса и постседиментационной истории этой толщи имеет очень большое значение, т. к. с её литолого-стратиграфическими аналогами сейчас связываются перспективы поиска, разведки и оценки углеводородных ресурсов в других нефтегазоносных бассейнах.

В асфальтитовом карьере Буркем экскурсанты-литологи имели возможность проследить характер распределения фильтрационно-миграционных твёрдых битумов, сопоставить их проявления с первичными и вторичными признаками пород.

Кроме того, вниманию экскурсантов были представлены природные выходы на дневную поверхность углеводородов, которые на территории России практически нигде более не встречаются. Известны летописные упоминания об использовании нефти Печорского края в бытовых целях еще в VIII–XIII веках. В начале XVIII века нефть вычерпывали из деревянных срубов-колодцев, возводимых над её естественными выходами. Подобную конструкцию можно на-



Просачивание нефти на дневную поверхность (р. Чуть, МО ГО «Ухта»). С. А. Дуб собирает нефть из колодца.

Фото А. Н. Сандулы

Oil seepage to the daylight surface (Chut river, Ukhta). S. A. Dub collects oil from the well. Photo by A. N. Sandula

блюдать сегодня на берегу р. Чуть вблизи трассы Ухта — Сыктывкар. Очень впечатляющий объект!

В поездке не обошлось без дискуссий и даже горячих споров на профессиональную тему, обусловленных в первую очередь существованием самостоятельных геологических школ в разных городах нашей страны. Нет сомнений, что за более чем 1000 км маршрута по асфальтовым, грунтовым и лесным дорогам истина появлялась где-то поблизости.

Гостям республики удалось попробовать аутентичную продукцию и даже выучить некоторые слова из коми языка, благо для этого были созданы все условия. В частности, навсегда запомнилось, что «ва» — это вода, «ю» — река, «вож» — приток, «эль» — ручей, «вад» — озеро, «яг» — бор, «из» — скала и так далее.

Безусловно, экскурсия «Малое геологическое кольцо Республики Коми» имеет очень высокий учебно-научный потенциал, поскольку должна быть интересна широкому кругу исследователей. В том числе она затрагивает вопросы геодинамики и региональной геологии, стратиграфии и палеонтологии, литологии и седиментологии, нефтегазовой геологии и горного дела, а также краеведения и топонимики. Участники благодарят организаторов экскурсии — Е. С. Пономаренко, А. Н. Сандулу, В. А. Матвеева, А. И. Антошкину, В. А. Салдина и водителя Дмитрия за гостеприимство и предоставленную возможность прикоснуться молотком к уникальным геологическим объектам юго-востока Республики Коми.

н. с. ИГТ УрО РАН С. А. Дуб,
д. г.-м. н. М. А. Тугарова («Газпромнефть НТЦ»),
К. Н. Чертина, Е. Н. Максимова
(Тюменский нефтяной научный центр)

Редакторы издательства:

О. В. Габова, К. В. Ордин

Компьютерная верстка

Т. В. Хазовой

Свид. о рег. средства массовой информации ПИ № ФС77-75435 от 19.04.2019, выданное Роскомнадзором. Отпечатано: 30.09.2021. Формат бумаги 60 × 84 ¹/₈. Печать RISO. Усл. п. л. 6,5. Тираж 140. Заказ 1167. Учредитель: Федеральное государственное бюджетное учреждение науки Федеральный исследовательский центр «Коми научный центр Уральского отделения Российской академии наук» (ФИЦ Коми НЦ УрО РАН). Редакция, издательство, типография: издательско-информационный отдел Института геологии имени академика Н. П. Юшкина Коми научного центра Уральского отделения Российской академии наук Федерального государственного бюджетного учреждения науки Федерального исследовательского центра «Коми научный центр Уральского отделения Российской академии наук» (ИГ ФИЦ Коми НЦ УрО РАН).

Адрес: 167982, Республика Коми, Сыктывкар, Первомайская, 54. Тел.: (8212) 24-51-60. Эл. почта: vestnik@geo.komisc.ru

На обложке использованы фото А. Соболевой, Ю. Глухова, В. Салдина, К. Романова.